



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING**

SYNCHRONNÍ GENERÁTOR PRACUJÍCÍ DO SAMOSTATNÉ ZÁTĚŽE

SYNCHRONOUS GENERATOR IN ISLAND OPERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROMAN JUCHELKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Roman Juchelka

ID: 146852

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Synchronní generátor pracující do samostatné zátěže

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte simulaci synchronního generátoru pracujícího do samostatné zátěže včetně regulátoru napětí
2. Provedte výpočet úbytků napětí na síti při připojení a odpojení zadaných zátěží
3. Simulaci provedte pro různé druhy regulátorů napětí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Chee-Mun Ong: Dynamic simulation of electric machinery. Prentice Hall PTR 1997
- [2] Cigánek, L., Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje
- [3] Fitzgerald, A.E., Kingsley, Ch., Kusko, A.: Electric machinery. McGraw Hill 1971
- [4] Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje. SNTL 1973

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou dynamické analýzy synchronního generátoru pracujícího do samostatné zátěže. Analýza je založena na základě teorie obecného elektrického stroje. Nejprve je uveden matematický popis synchronního generátoru, který je následně převeden z reálných veličin pomocí Parkovy transformace do systému veličin d , q , 0 . Poté je provedena samotná analýza změny napětí v závislosti na skokové změně zátěže synchronního generátoru v prostředí programu MATLAB Simulink, ve kterém byly sestaveny univerzální modely použitelné pro analýzu různých strojů při různých změnách zatížení a pro simulaci zkratů. V práci jsou také zmíněny možnosti buzení synchronního generátoru a vliv tlumicího vinutí na jeho činnost.

Abstract

This thesis deals with the dynamic analysis of a synchronous generator in island operation. The analysis is based on the basis of the theory of generalized electric machine. First the mathematical description of the synchronous generator is converted from real quantities to the quantities d , q , 0 using Park's transformation. In the next part of thesis is done the analysis of voltage change dependent on the load change in MATLAB Simulink software. Universal models useful for analysis of various machines and various load changes and short-circuit faults simulation were created in this software. There is also mentioned the possibility of excitation of synchronous generator and the effect of damping winding on its operation.

Klíčová slova

Synchronní; generátor; Matlab; Simulink; obecný elektrický stroj; změna zátěže

Keywords

Synchronous; generator; Matlab; Simulink; generalized electric machine; load change

Bibliografická citace

JUCHELKA, R. Synchronní generátor pracující do samostatné zátěže. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Synchronní generátor pracující do samostatné zátěže* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

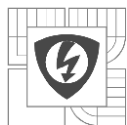
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc. a Ing. Rostislavu Huzlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

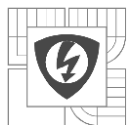
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
FORMULACE CÍLŮ.....	11
ÚVOD	12
1 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR.....	13
1.1 VNITŘNÍ ZÁTĚŽNÝ ÚHEL B_f	14
1.2 MATEMATICKÝ POPIS SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	15
1.2.1 INDUKČNOSTI SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	16
2 OBECNÝ ELEKTRICKÝ STROJ.....	18
2.1 PARKOVA LINEÁRNÍ TRANSFORMACE.....	19
2.1.1 TRANSFORMACE NAPĚŤOVÝCH ROVNIC.....	20
2.1.2 TRANSFORMACE ROVNIC PRO SPŘAŽENÉ MAGNETICKÉ TOKY	21
2.1.3 TRANSFORMACE VÝKONU A VNITŘNÍHO MOMENTU	22
3 BUZENÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	23
3.1 STATICKÉ BUDIČE.....	23
3.2 ROTUJÍCÍ BUDIČE.....	23
3.2.1 DERIVAČNÍ DYNAMO	23
3.2.2 BEZKROUŽKOVÉ BUZENÍ	23
4 TLUMICÍ VINUTÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	25
4.1 VLIV TLUMICÍHO VINUTÍ NA STABILITU PŘI PŘECHODNÝCH DĚJÍCH	26
5 TRANSIENTNÍ A SUBTRANSIENTNÍ REAKTANCE	28
6 VÝPOČET ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI ZMĚNĚ ZÁTĚŽE.....	30
6.1 PARAMETRY SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	30
6.2 SIMULACE V MATLAB SIMULINK	31
6.3 SIMULACE S BUDICÍM SYSTÉMEM DC1A.....	32
6.4 SIMULACE S BUDICÍM SYSTÉMEM AC4A.....	34
6.5 SIMULACE S BUDICÍM SYSTÉMEM AC1A.....	37
7 SIMULACE ZKRATU SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	40
8 ZÁVĚR.....	46
LITERATURA	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	48



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1-1 Základní konstrukční uspořádání generátoru s hladkým rotorem</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 1-2 Základní elektrické schéma synchronního generátoru [2].....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 1-3 Reakce kotvy [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 1-4 Zátěžný úhel RL zátěž [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 1-5 Vzájemná indukčnost statorových vinutí</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-1 Uspořádání vinutí obecného elektrického stroje [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2-2 Uspořádání vinutí synchronního stroje [1]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-1 Schéma uspořádání alternátoru s bezkroužkovým budičem [4].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4-1 Konstrukce tlumicího vinutí.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4-2 Obvodové schéma v ose d synchronního generátoru s tlumicím vinutím [5].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4-3 Závislost momentu na hřídeli na zátěžném úhlu [6]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5-1 Obvodový model vinutí v ose d při rázovém ději. [9].....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5-2 Obvodový model vinutí v ose d při přechodném ději. [9]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5-3 Obvodový model vinutí v ose d při ustáleném chodu. [9]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 6-1 Schéma zapojení modelu s budičím systémem DC1A.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 6-2 Schéma budičího systému DC1A. Převzato z [10].</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6-3 Simulace změny napětí při poklesu zátěže na 60 % s regulací DC1A.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6-4 Schéma budičího systému AC4A. Převzato z [10].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6-5 Simulace změny napětí při nárůstu zátěže z 60 % na 100 % s regulací AC4A</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6-6 Simulace změny napětí při nárůstu zátěže z 60 % na 100 % s regulací AC4A s upravenými parametry.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6-7 Schéma budičího systému AC1A. Převzato z [10].....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6-8 Simulace změny napětí při poklesu zátěže ze 100 % na 60 % s regulací DC1A.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 7-1 Schéma zapojení modelu při simulaci zkratů</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7-2 Průběh fázových napětí a proudů při třífázovém zemním zkratu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 7-3 Průběh proudu tlumicím vinutím a elektromagnetického momentu při třífázovém zemním zkratu.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 7-4 Průběh fázových napětí a proudů při dvoufázovém zemním zkratu</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 7-5 Průběh proudu tlumicím vinutím a vnitřní moment při dvoufázovém zemním zkratu</i>	<i>44</i>



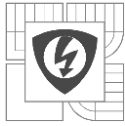
Seznam tabulek

<i>Tabulka 6-1 Parametry použitého synchronního generátoru</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 6-2 Parametry budicího systému DC1A.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 6-3 Parametry budicího systému AC4A</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6-4 Upravené parametry budicího systému AC4A.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6-5 Parametry budicího systému DC1A.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7-1 Parametry zátěže při simulaci zkratů</i>	<i>40</i>

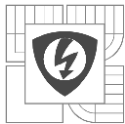


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam	Jednotka
a, a^2	Operátory natočení	-
AC1A, AC4A, DC1A	Typy regulačních bloků	-
E_{fd1}, E_{fd2}	Napětí budiče, na kterém je definovaná saturace	[pu]
f	Frekvence	[Hz]
G_d, G_q	Rotační indukčnost vinutí v osách d a q	[H]
$G_{df}, G_{dD}, G_{qg}, G_{qQ}$	Vzájemné rotační indukčnosti vinutí v osách d a q	[H]
i_a, i_b, i_c	Proudy statorových vinutí	[A]
i_d, i_q, i_0	Proud v systému veličin d, q, 0	[A]
i_k, i_n	Proud vinutí stroje	[A]
J	Moment setrvačnosti stroje	[kgm ²]
K_a	Zesílení hlavního regulátoru	-
K_c	Zesílení reprezentující vliv komutace usměrňovače	-
K_d	Zesílení reprezentující vliv demagnetizace na budič	-
k_d, k_q, k_0	Transformační koeficienty Parkovi transformace	[-]
K_e	Zesílení budiče	-
K_f	Zesílení derivační zpětné vazby budičeho systému	-
L_{an}, L_{bn}, L_{cn}	Vzájemná indukčnost vinutí statoru a rotorových vinutí v ose d	[H]
$L_{anM}, L_{bnM}, L_{cnM}$	Maximální hodnota vzájemné indukčnosti statorových a	[H]
L_{aQ}, L_{bQ}, L_{cQ}	Vzájemná indukčnost vinutí statoru a rotorových vinutí v ose q	[H]
$L_{aQM}, L_{bQM}, L_{cQM}$	Maximální hodnota vzájemné indukčnosti statorových a	[H]
L_d, L_q, L_0	Indukčnost stroje v systému veličin d, q, 0	[H]
L_{kn}	Indukčnost vinutí a vzájemné indukčnosti vinutí stroje	[H]
M	Moment stroje	[Nm]
m_i	Vnitřní moment stroje	[Nm]
m_m	Mechanický moment	[Nm]
M_{zv}	Moment zvratu stroje	[Nm]
n	Otáčky	[min ⁻¹]
p	Počet pólových dvojic stroje	[-]
p	Okamžitý výkon	[W]
pu	Poměrné jednotky	
R_d, R_q, R_0	Odpor v systému veličin d, q, 0	[Ω]
R_k	Odpor vinutí stroje	[Ω]
R_s	Odpor statoru	[Ω]
$R_{s(pu)}$	Odpor statoru v poměrných jednotkách	[pu]
S_{Efd1}, S_{Efd2}	Saturační koeficienty budiče	[pu]
S_{eVe1}, S_{eVe2}	Saturační koeficienty budiče	[pu]
S_n	Jmenovitý výkon	[VA]
t	Čas	[s]
T_a	Časová konstanta hlavního regulátoru	[s]

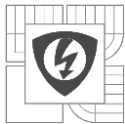


T_b, T_c	Časové konstanty regulátoru	[s]
T_d'	Transientní časová konstanta nakrátko v ose d	[s]
T_d'', T_{qo}''	Subtransientní časová konstanta nakrátko v ose d a q	[s]
T_e	Časová konstanta budiče	[s]
T_f	Časová konstanta derivační zpětné vazby budicího systému	[s]
T_r	Časová konstanta vstupní dolní propusti budicího systému	[s]
U_a	Amplituda fázového napětí	[V]
U_{aU}, U_{aV}, U_{aW}	Sousledné složky fázových napětí	[V]
u_d, u_q, u_0	Napětí v systému veličin d, q, 0	[V]
u_k	Napětí vinutí stroje	[V]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
V_{Amin}, V_{Amax}	Maximální a minimální hodnoty výstupního napětí regulátoru	[pu]
V_{e1}, V_{e2}	Napětí charakterizující saturaci budiče	[pu]
V_{Imin}, V_{Imax}	Vstupní napěťové limity regulátoru	[pu]
V_r	Regulační napětí	[pu]
V_{Rmin}, V_{Rmax}	Výstupní napěťové limity hlavního regulátoru	[pu]
x_a, x_b, x_c	Libovolná veličina v reálných souřadnicích	
X_d, X_q	Podélná reaktance v osách d a q	[Ω]
X_d', X_q'	Transientní reaktance v osách d a q	[Ω]
X_d'', X_q''	Subtransientní reaktance v osách d a q	[Ω]
x_d, x_q, x_0	Libovolná veličina v systému d, q, 0	
X_{fd}	Reaktance budicího vinutí v ose d	[Ω]
$X_{fσ}$	Reaktance způsobená reakcí budicího vinutí na zkrat	[Ω]
$X_l, X_σ$	Rozptylová reaktance	[Ω]
X_{rkd}, X_{rkq}	Reaktance reakce kotvy v osách d a q	[Ω]
X_{td}	Reaktance tlumicího vinutí v ose d	[Ω]
$X_{tσd}, X_{tσq}$	Reaktance reakce tlumicích vinutí na zkrat v osách d a q	[Ω]
Z	Impedance	[Ω]
$Z_{(pu)}$	Impedance v poměrných jednotkách	[pu]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α	Elektrický úhel	[°]
α_m	Mechanický úhel	[°]
β	Zátěžný úhel stroje	[°]
Ψ_d, Ψ_q, Ψ_q	Magnetický tok v systému veličin d, q, 0	[Wb]
Ψ_{dr}, Ψ_{qr}	Rotační magnetický tok v osách d a q	[Wb]
Ψ_f, Ψ_D, Ψ_Q	Spřažený magnetický tok rotorových vinutí	[Wb]
Ψ_k	Spřažený magnetický tok vinutí stroje	[Wb]
ω_m	Mechanická úhlová rychlost stroje	[rads ⁻¹]



FORMULACE CÍLŮ

Tato bakalářská práce se bude zabývat problematikou přechodných dějů při náhlé skokové změně zátěže synchronního generátoru. Při této akci dochází ke krátkodobému poklesu napětí při zvýšení zátěže nebo ke krátkodobému zvýšení napětí při odlehčení. V úvodní části práce bude popsána teorie, na základě které probíhá analýza těchto jevů výpočetními programy. Matematický model synchronního generátoru bude transformován ze systému reálných veličin do systému veličin d , q , 0 . Následně bude provedena simulace těchto přechodných dějů v prostředí programu MATLAB Simulink s využitím různých regulátorů buzení reagujících na tyto skokové změny zátěže. Hlavním výstupem této práce bude sestavení univerzálních počítačových modelů použitelných pro analýzu přechodných dějů spojených se změnou zátěže na libovolném synchronním generátoru.



ÚVOD

Synchronní generátor patří mezi točivé elektrické stroje. Jeho základní charakteristikou je skutečnost, že se mechanická úhlová rychlost shoduje (s ohledem na počet pólových dvojic stroje) s úhlovou rychlostí magnetického pole statoru a tím pádem i s úhlovou rychlostí generovaného napětí. [2]

Hlavními konstrukčními prvky jsou podobně jako u ostatních točivých strojů stator a rotor. Stator a rotor spolu se vzduchovou mezerou tvoří magnetický obvod stroje. Obvykle jsou vyráběny z feromagnetických materiálů rozdělených do vzájemně izolovaných tenkých plechů z důvodu snížení ztrát vířivými proudy. Kvůli minimalizaci hysterezních ztrát jsou pak voleny magneticky měkké materiály, které mají menší plochu hysterezní křivky. [2]

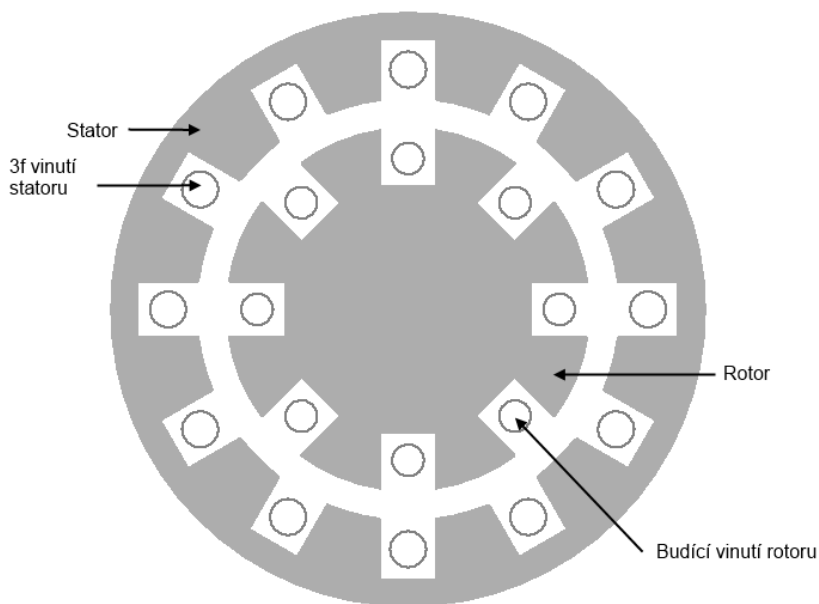
Synchronní generátor má dále několik elektrických obvodů. V drážkách statoru je umístěno třífázové vinutí, které je připojeno do sítě nebo do zátěže. Toto vinutí je souměrné a cívky jednotlivých fází jsou vůči sobě posunuty o 120° elektrických. Na rotoru je umístěno budicí vinutí. Může být umístěno v drážkách nebo na vyniklých pólových nástavcích. Budicí vinutí může být na rotoru doplněno také tlumicím vinutím plnícím různé funkce. Z hlediska materiálů je pro vinutí nejčastěji používána velmi čistá elektrolytická měď. [2]

Princip činnosti synchronního generátoru je založen na proměnném magnetickém poli rotoru, díky kterému se v cívkách statoru indukuje napětí. Stejnoseměrný proud v budicím vinutí vytváří magnetické pole, které se otáčí spolu s rotorem. Dochází tak přeměně mechanické energie dodané vnějším zdrojem roztáčejícím rotor (turbína, dieselový agregát) na energii elektrickou. [2]

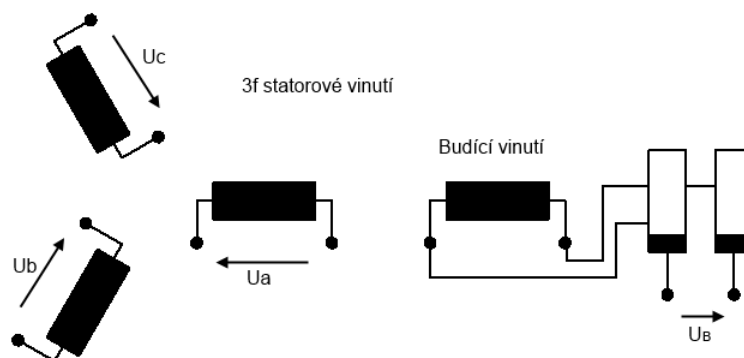
1 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR

Synchronní generátory lze nejjednodušeji rozdělit podle typu konstrukce rotoru. Rozlišujeme stroje s vyniklými póly na rotoru a stroje s hladkým rotorem. S tímto rozdělením souvisí i výrazné rozdíly při analýze strojů a jejich praktické aplikaci.

Generátory s vyniklými póly jsou pomaluběžné, tzn. pracují s nižšími otáčkami, a jsou nejčastěji využívány v kombinaci s vodními turbínami. Proto se často můžeme u těchto strojů setkat s označením hydroalternátory. Mívají velký průměr a naopak menší osovou délku. V praxi jsou nejčastěji instalovány ve vodních elektrárnách. Generátory s hladkým rotorem neboli turboalternátory jsou naopak schopny pracovat s vyššími otáčkami a jsou používány například v kombinaci s dieselovými agregáty. V porovnání s hydroalternátory se vyznačují menším průměrem a větší osovou délkou. Jejich analýza je pak částečně zjednodušena díky konstantní velikosti vzduchové mezery. Uplatnění nacházejí zejména v tepelných elektrárnách. Základní konstrukční uspořádání generátoru s hladkým rotorem je znázorněno na obrázku 1-1. Jeho zjednodušené elektrické schéma je pak na obrázku 1-2.



Obrázek 1-1 Základní konstrukční uspořádání generátoru s hladkým rotorem



Obrázek 1-2 Základní elektrické schéma synchronního generátoru [2]

1.1 Vnitřní zátěžný úhel β_i

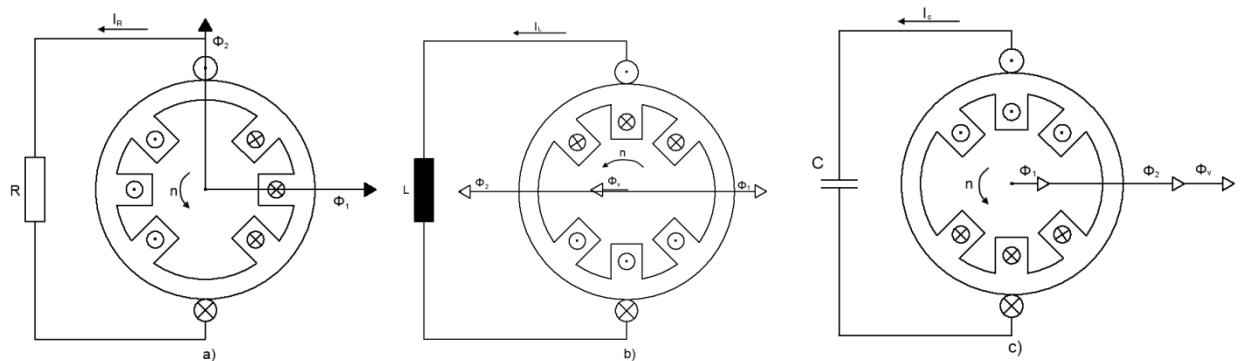
Vnitřní zátěžný úhel β_i je definován jako vzájemné prostorové natočení mezi magnetickým tokem budicího vinutí a výsledným magnetickým tokem ve vzduchové mezeře. Tento vzájemný posun je způsoben reakčním magnetickým tokem statorového vinutí a jeho velikost je dána charakterem a velikostí zátěže připojené ke statorovému vinutí. Dohodou je stanoveno, že v případě generátoru jsou hodnoty zátěžného úhlu záporné, zatímco u motoru jsou kladné. Vnitřní zátěžný úhel β_i nesmí v absolutní hodnotě překročit 90° . V opačném případě by došlo k výpadku ze synchronismu, což je závažný poruchový stav a musí dojít k odstavení stroje. [2]

Předpokládáme generátor s hladkým rotorem, harmonické průběhy napětí, proudů i magnetických toků a ze statorového vinutí uvažujeme jen jednu fázi. V případě, že generátor zatížíme čistě odporovou zátěží, dosahuje reakční tok statoru maximální hodnoty při natočení rotoru zobrazeném na obrázku 1-3a (napětí i proud zátěží jsou ve fázi). Výsledný magnetický tok ve vzduchové mezeře je pak dán vektorovým součtem toků φ_1 a φ_2 . Zátěžný úhel β_i pak může dosahovat hodnot od 0 do -90° . [2]

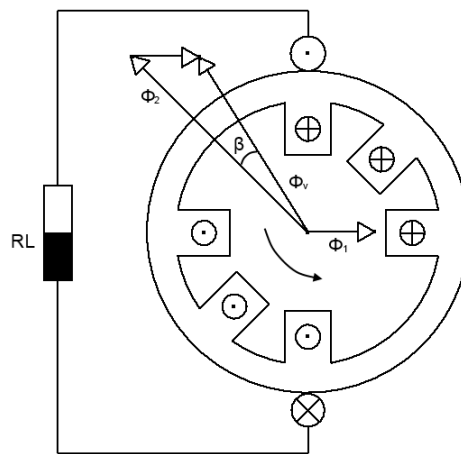
Pokud bychom na výstupní svorky statoru připojili čistě induktivní zátěž, dosahuje díky vzájemnému posunu napětí a proudu na indukčnosti reakční tok maximální hodnoty v poloze naznačené na obrázku 1-3b. V tomto případě reakční tok působí přímo proti toku budicího vinutí a směr výsledného magnetického toku závisí čistě na velikosti reakčního toku, který je dán odebíraným proudem.

V případě čistě kapacitní zátěže, kdy proud předbíhá napětí o 90° , působí maximální reakční tok stejným směrem jako budicí při poloze rotoru znázorněné na obrázku 1-3c. V tomto případě je tedy výsledný magnetický tok vždy ve fázi s budicím magnetickým tokem a nemůže dojít k výpadku ze synchronismu v důsledku přetížení. [2]

V praxi se nicméně vyskytují spíše zátěže kombinovaného charakteru. Situace s kombinovanou zátěží LR je znázorněna na obrázku 1-4. V tomto případě záleží jak na samotném charakteru konkrétní zátěže, tak i na její velikosti a v důsledku přetížení může dojít k výpadku ze synchronismu. [2]



Obrázek 1-3 Reakce kotvy [2]



Obrázek 1-4 Zátěžný úhel RL zátěž [2]

1.2 Matematický popis synchronního generátoru

K popisu synchronního stroje je potřeba soustava několika rovnic. První skupinu tvoří napěťové rovnice 1-1 jednotlivých vinutí. [1]

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad k = a, b, c, f, D, Q \quad 1-1$$

Indexy a, b, c zastupují jednotlivá fázová vedení na statoru, index f budící vinutí na rotoru a indexy D a Q podélné a příčné tlumicí vinutí na rotoru. Těchto 6 napěťových rovnic je potřeba ještě doplnit rovnicemi 1-2 pro spřažené magnetické toky jednotlivých vinutí. [1]

$$\psi_k = \sum_n L_{kn} i_n \quad k, n = a, b, c, f, D, Q \quad 1-2$$

Soustava rovnic pro spřažené magnetické toky obsahuje 6 vlastních indukčností jednotlivých vinutí a 13 vzájemných indukčností, přičemž indukčnosti navzájem kolmých vinutí L_{fQ} , L_{Qf} , L_{DQ} , L_{QD} považujeme za nulové, neboli tato vinutí mezi sebou nemají magnetickou vazbu. Pro úplný popis synchronního generátoru je pak ještě potřeba vzít v úvahu pohybovou rovnici 1-3. [1]

$$-m_m = J \frac{d\omega_m}{dt} - m_i \quad 1-3$$

V této rovnici představuje m_i vnitřní elektromagnetický moment, J moment setrvačnosti, ω_m mechanickou úhlovou rychlost a m_m mechanický moment na hřídeli. Znaménka vnitřního momentu a momentu na hřídeli jsou určena dohodou, podle které jsou pro generátor hodnoty těchto momentů záporné. Předpokládáme-li, že mechanický moment na hřídeli je dán, je potřeba ještě vyjádřit vnitřní elektromagnetický moment. K tomu můžeme využít energetickou bilanci stroje. [1]

1.2.1 Indukčnosti synchronního generátoru

Všechny vzájemné indukčnosti synchronního generátoru jsou v obecném případě závislé na vzájemné relativní poloze statoru a rotoru. To platí u synchronních generátorů s vyniklými póly, kdy se se změnou polohy rotoru mění velikost vzduchové mezery a tudíž i magnetická vodivost jednotlivých magnetických obvodů. V případě synchronních generátorů s hladkým rotorem podobně jako u asynchronních strojů, kdy má vzduchová mezera konstantní rozměr, jsou vzájemné indukčnosti vinutí statoru a vzájemné indukčnosti rotoru nezávislé na poloze rotoru a dochází tak k výraznému zjednodušení analýzy. Stejně tak vlastní indukčnosti jednotlivých vinutí považujeme díky válcovitému tvaru statoru a zanedbání drážkování za konstantní. [1]

Na vzájemné poloze rotoru a statoru pak zůstanou závislé vzájemné indukčnosti vinutí statoru a rotoru. Maximální hodnoty vzájemné indukčnosti v podélné ose rotoru dosahují, pokud je osa vinutí na rotoru shodná s osou vinutí na statoru, a naopak nulové hodnoty, pokud jsou tyto osy na sebe navzájem kolmé. V případě, že uvažujeme symetrická vinutí vzájemně posunutá o 120° , lze tuto závislost pro budicí vinutí f a tlumicí vinutí D matematicky popsat rovnicemi 1-4, 1-5 a 1-6. [1]

$$L_{an} = L_{na} = L_{anM} \cos(\varphi) \quad n = f, D \quad 1-4$$

$$L_{bn} = L_{nb} = L_{bnM} \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) \quad n = f, D \quad 1-5$$

$$L_{cn} = L_{nc} = L_{cnM} \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \quad n = f, D \quad 1-6$$

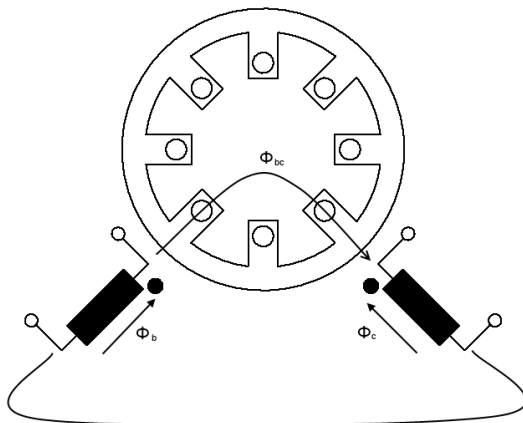
Tlumicí vinutí rotoru Q je pak pootočeno o 90° a tak pro něj platí závislost:

$$L_{aQ} = L_{aQ} = -L_{aQM} \sin(\varphi) \quad 1-7$$

$$L_{bQ} = L_{bQ} = -L_{aQM} \sin(\varphi - \frac{2\pi}{3}) \quad 1-8$$

$$L_{cQ} = L_{cQ} = -L_{aQM} \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \quad 1-9$$

Vzájemné indukčnosti statorových vinutí mají záporné hodnoty, protože magnetický tok vyvolaný jednou cívkou v druhé cívkce má opačný směr než vlastní magnetický tok druhé cívky. Situace je znázorněna na obrázku 1-5. [1]



Obrázek 1-5 Vzájemná indukčnost statorových vinutí

Pokud vezmeme v úvahu tyto závislosti indukčností, lze pro synchronní generátor s hladkým rotorem napsat soustavu rovnic pro spřažení magnetické toky v maticové podobě dle vztahu 1-10. Pro stroj s vyniklými póly by pak vlastní a vzájemné indukčnosti byli upraveny o složku závislou na poloze rotoru.

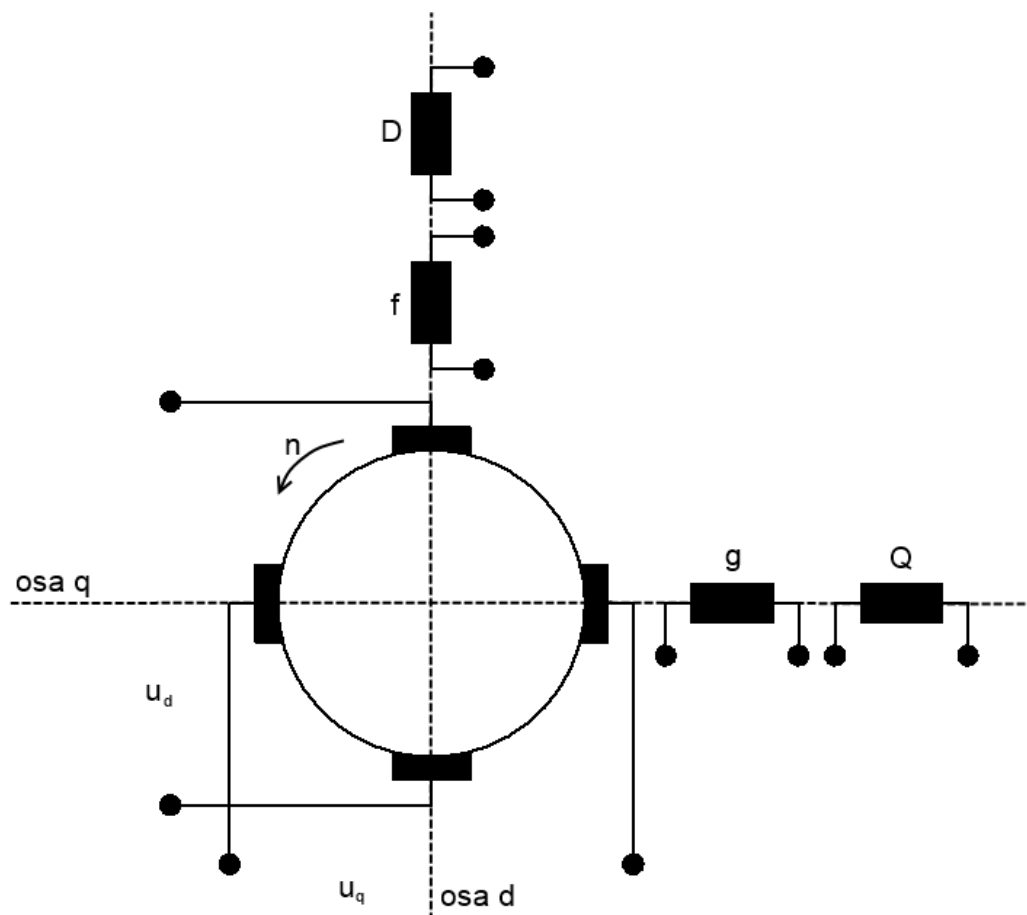
$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} & L_{afM} \cos(\varphi) & L_{adM} \cos(\varphi) & -L_{aQ} \sin(\varphi) \\ -L_{ba} & L_{bb} & -L_{bc} & L_{afM} \cos(\varphi - 2\pi/3) & L_{adM} \cos(\varphi - 2\pi/3) & -L_{aQM} \sin(\varphi - 2\pi/3) \\ -L_{ca} & -L_{cb} & L_{cc} & L_{afM} \cos(\varphi + 2\pi/3) & L_{adM} \cos(\varphi + 2\pi/3) & -L_{aQM} \sin(\varphi + 2\pi/3) \\ L_{afM} \cos(\varphi) & L_{afM} \cos(\varphi - 2\pi/3) & L_{afM} \cos(\varphi + 2\pi/3) & L_{ff} & L_{fD} & 0 \\ L_{adM} \cos(\varphi) & L_{adM} \cos(\varphi - 2\pi/3) & L_{adM} \cos(\varphi + 2\pi/3) & L_{Df} & L_{DD} & 0 \\ -L_{aQ} \sin(\varphi) & -L_{aQM} \sin(\varphi - 2\pi/3) & -L_{aQM} \sin(\varphi + 2\pi/3) & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad 1-10$$

2 OBECNÝ ELEKTRICKÝ STROJ

Teorie obecného elektrického stroje se využívá při analýze přechodných dějů synchronního generátoru z důvodu kratších výpočetních časů a lepší možnosti řízení, které jsou nezbytné při účinné regulaci provozu. Obecný stroj spojuje vlastnosti společné všem točivým elektrickým strojům, na druhou stranu však nepopisuje speciální děje unikátní pro jednotlivé druhy strojů. Jedná se o dvoupólový komutátorový stroj se dvěma sadami kartáčů. Statorové vinutí je umístěno na dvou hlavních pólech v na sebe navzájem kolmých osách d a q . Obecně uvažujeme, že v každé z os d i q jsou umístěné dvě vinutí, která mohou plnit různé funkce. Uspořádání vinutí je na obrázku 2-1. V případě potřeby je možné toto dvoupólové uspořádání převést na $2p$ -pólový stroje přepočtením elektrických úhlů dvoupólového stroje na mechanické úhly $2p$ -pólového stroje podle vztahu 2-1.[1]

$$\alpha = p\alpha_m$$

2-1



Obrázek 2-1 Uspořádání vinutí obecného elektrického stroje [1]

Chod obecného elektrického stroje lze podobně jako synchronní generátor popsat soustavou napěťových rovnic, rovnic pro spřažené magnetické toky a pohybovou rovnicí. Na rozdíl od synchronního generátoru zde ale navíc zavádíme rovnice 2-2 a 2-3 pro dva rotační spřažené magnetické toky pro osy d a q , které jsou závislé na rotačních indukčnostech. [1]

$$\psi_{dr} = G_d i_d + G_{df} i_f + G_{dD} i_D \quad 2-2$$

$$\psi_{qr} = G_q i_q + G_{qg} i_g + G_{qQ} i_Q \quad 2-3$$

Pohybovou rovnicí je pak ještě potřeba doplnit vztahem 2-4 pro vnitřní elektromagnetický moment. [1]

$$m_i = p \left(\left| \frac{i_q \partial \psi}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=-\pi/2} + \left| \frac{i_d \partial \psi}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} \right) \quad 2-4$$

2.1 Parkova lineární transformace

Aby bylo možné řešit stavy synchronního generátoru pomocí teorie obecného elektrického stroje, je potřeba ho nejprve vhodně transformovat. K tomu lze využít Parkovu transformaci $d, q, 0$, která převede konkrétní veličiny synchronního generátoru x_a, x_b, x_c na fiktivní veličiny x_d, x_q, x_0 . Převod veličin je potřeba uskutečnit pomocí transformačních rovnic 2-5, 2-6 a 2-7. V případě, že je původní třífázová soustava veličin souměrná, bude transformovaná složka x_0 nulová a dojde tedy redukci třífázového systému na dvoufázový. [1]

$$x_d = k_d \left[x_a \cos \varphi + x_b \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + x_c \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad 2-5$$

$$x_q = -k_q \left[x_a \sin \varphi + x_b \sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + x_c \sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad 2-6$$

$$x_0 = k_0 [x_a + x_b + x_c] \quad 2-7$$

Po vyřešení zkoumaných dějů v soustavě $d, q, 0$ je fiktivní veličiny možné zpětně transformovat pomocí vztahů 2-8, 2-9 a 2-10. [1]

$$x_a = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} x_d \cos \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} x_q \sin \varphi + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} x_0 \quad 2-8$$

$$x_b = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} x_d \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} x_q \sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} x_0 \quad 2-9$$

$$x_c = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} x_d \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} x_q \sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} x_0 \quad 2-10$$

Transformační koeficienty k_d, k_q a k_0 mohou mít libovolnou nenulovou hodnotu. Nejčastěji se pro transformaci napětí, proudů i magnetických toků volí shodné koeficienty. Pro splnění podmínky invariantnosti výkonů (viz rovnice 2-11) je potřeba, aby se inverzní transformační matice rovnala matici pro zpětnou transformaci (viz rovnice 2-12). Na základě tohoto principu pak musí mít transformační koeficienty hodnoty dle rovnic 2-13 a 2-14. [1]

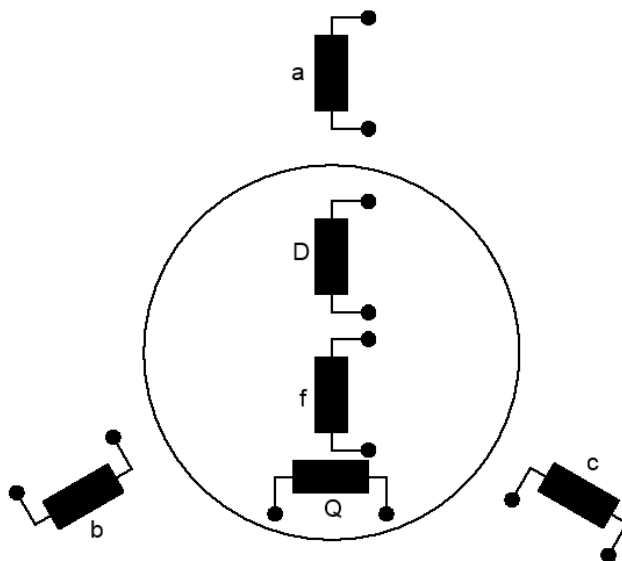
$$u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = u_d i_d + u_q i_q + u_0 i_0 \quad 2-11$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \varphi & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin \varphi & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_d \cos \varphi & -k_q \sin \varphi & k_0 \\ k_d \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & -k_q \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & k_0 \\ k_d \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) & -k_q \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) & k_0 \end{bmatrix} \quad 2-12$$

$$k_d = k_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad 2-13$$

$$k_0 = \sqrt{\frac{1}{3}} \quad 2-14$$

V případě transformovaného synchronního stroje na rozdíl od obecného elektrického stroje osa q předbíhá při kladném směru otáčení proti směru hodinových ručiček osu d o 90° (u obecného elektrického stroje osa d přebíhá osu q o 90°). Schematické uspořádání vinutí synchronního stroje, ze kterého vycházíme při transformaci synchronního stroje do systému d - q os, je znázorněno na obrázku 2-2. [1]



Obrázek 2-2 Uspořádání vinutí synchronního stroje [1]

2.1.1 Transformace napěťových rovnic

Pro transformaci napěťových rovnic statoru využijeme vztah pro zpětnou transformaci spřaženého magnetického toku statoru vycházející z rovnice 2-8. Derivací tohoto vztahu podle času za předpokladu $\varphi = \omega t + \varphi_0$ získáme výraz 2-15. [1]

$$\frac{d\psi_a}{dt} = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \frac{d\psi_d}{dt} \cos \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \omega \psi_d \sin \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \frac{d\psi_q}{dt} \sin \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \omega \psi_q \cos \varphi + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \frac{d\psi_0}{dt} \quad 2-15$$

Derivaci spřaženého magnetického toku podle času lze také vyjádřit z rovnice 1-1 pro příslušnou fázi, do které následně dosadíme transformované veličiny napětí a proudu. Získáme tak vztah 2-16. [1]

$$\frac{d\psi_a}{dt} = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} u_d \cos \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} u_q \sin \varphi + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} u_0 - R \left(\frac{2}{3} \frac{1}{k_d} i_d \cos \varphi - \frac{2}{3} \frac{1}{k_q} i_q \sin \varphi + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} i_0 \right) \quad 2-16$$

Jelikož se pravé strany rovnic 2-15 a 2-16 rovnají, lze napět'ové rovnice statoru transformovaného synchronního stroje vyjádřit na základě rovnosti koeficientů u členů se shodnými goniometrickými funkcemi a bez goniometrické funkce. Při shodných hodnotách transformačních koeficientů k_d a k_q (viz 2-13) budou mít napět'ové rovnice statoru tvar: [1]

$$u_d = R_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad 2-17$$

$$u_q = R_q i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad 2-18$$

$$u_0 = R_0 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad 2-19$$

Napět'ové rovnice vinutí rotoru není potřeba transformovat, protože osy d a q jsou pevně spojeny s rotorem stroje. Vztahy tedy budou stejné, jako uvádí rovnice 1-1. Transformací napět'ových rovnic jsme odstranili časové proměnné koeficienty rovnic a zároveň jednoznačně oddělili složky napětí podílející se na tvorbě spřaženého magnetického toku a na tvorbě momentu.

2.1.2 Transformace rovnic pro spřažené magnetické toky

Pro transformaci spřažených magnetických toků rotorových vinutí vyjdeme ze vztahů pro jednotlivé toky uvedenými v maticové rovnici 1-10. S využitím transformace statorových proudů i_a , i_b a i_c podle rovnice 2-5 vyjádříme transformované spřažené magnetické toky rovnicemi 2-20 až 2-22. [1]

$$\psi_f = \frac{1}{k_d} L_{afM} i_d + L_{ff} i_f + L_{fD} i_D \quad 2-20$$

$$\psi_D = \frac{1}{k_d} L_{aDM} i_d + L_{Df} i_f + L_{DD} i_D \quad 2-21$$

$$\psi_Q = \frac{1}{k_q} L_{aQM} i_q + L_{Qq} i_Q \quad 2-22$$

Transformaci spřažených magnetických toků statorových vinutí provedeme přímým dosazením do transformačních rovnic 2-5 – 2-7, přičemž za samotné toky dosazujeme jejich závislosti na jednotlivých indukčnostech. Algebraickými úpravami pak dostaneme vztahy 2-23, 2-24 a 2-25. [1]

$$\psi_d = L_d i_d + \frac{3}{2} k_d L_{afM} i_f + \frac{3}{2} k_d L_{aDM} i_D \quad 2-23$$

$$\psi_q = L_q i_q + \frac{3}{2} k_q L_{aQM} i_Q \quad 2-24$$

$$\psi_0 = L_0 i_0 \quad 2-25$$

V těchto rovnicích lze vidět nové transformované indukčnosti, které nazýváme synchronní podélná indukčnost (L_d), synchronní příčná indukčnost (L_q) a netočivá indukčnost (L_0). Tyto transformované indukčnosti jsou přímo závislé na reálných indukčnostech stroje. Vzájemně

vztahy těchto indukčností uvádí vztahy 2-26 – 2-28. Tyto vztahy předpokládají souměrné vinutí, a tedy i shodné vlastní indukčnosti všech tří fází a shodné vzájemné indukčnosti jednotlivých fází. U synchronních strojů s hladkým rotorem jsou příčná a podélná synchronní indukčnost shodné. V případě strojů s vyniklými póly se tyto dvě indukčnosti liší díky složce závislé na poloze rotoru. [1]

$$L_d = L_a + L_{ab} \quad 2-26$$

$$L_q = L_a + L_{ab} \quad 2-27$$

$$L_0 = L_a - 2L_{ab} \quad 2-28$$

2.1.3 Transformace výkonu a vnitřního momentu

Jelikož je celkový třífázový výkon dán součtem součinů napětí a proudů jednotlivých fází stroje, vyjdeme při transformaci výkonu ze zpětných transformačních rovnic 2-8 – 2-10 pro příslušná napětí a proudy. Na základě těchto vztahů dostaneme pro transformovaný výkon výraz 2-29. Z této rovnice je patrné, že v případě volby transformačních koeficientů podle 2-13 a 2-14 zůstane zachován princip invariantnosti výkonu, tzn. že při výpočtu transformovaného výkonu jsou koeficienty, kterými násobíme součin jednotlivých napětí a proudů, rovny jedné. [1]

$$p = \frac{2}{3} \frac{1}{k_d^2} u_d i_d + \frac{2}{3} \frac{1}{k_q^2} u_q i_q + \frac{1}{3} \frac{1}{k_0^2} u_0 i_0 \quad 2-29$$

Na tvorbě vnitřního momentu se podílí pouze vnitřní výkon přenášených vzduchovou mezerou, který je po transformaci stroje dán rotačními složkami napětí. Tato napětí se vyskytují v napěťových rovnicích 2-17 a 2-18, kde jsou dány jejich posledními členy. Díky tomu je možné transformovaný vnitřní moment vyjádřit vztahem 2-30. [1]

$$m_i = \frac{p_i}{\omega_m} = \frac{\omega \psi_d i_q - \omega \psi_q i_d}{\frac{\omega}{p}} = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad 2-30$$

3 BUZENÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

Buzení je nezbytným prvkem potřebným pro chod a regulaci synchronního generátoru. Budicí vinutí je u standardních synchronních generátorů umístěno na rotoru a jeho magnetické pole je buzeno vždy stejnosměrným proudem. Regulace buzení pak probíhá právě změnou velikosti tohoto proudu. Základním požadavkem na budicí soustavu z hlediska regulace je velmi rychlá odezva v čase. Budicí soustavy lze rozdělit na statické a rotující.

3.1 Statické budiče

Statické budiče jsou obvykle napájeny třífázovým napětím. Napájení budiče může být provedeno několika způsoby. První možností je napájení odbočkou ze sítě vlastní spotřeby. Další variantou je zapojení transformátoru k výstupu generátoru nebo lze budicí jednotku napájet odbočkou ze satorového vinutí. Tyto způsoby ale vyžadují funkční napájení již při startu generátoru pro počáteční nabuzení, a proto nelze tyto stroje startovat do tmy nebo využívat pro napájení ostrovní sítě. Tuto nevýhodu lze kompenzovat akumulacími bateriemi, které zajistí počáteční nabuzení při rozběhu generátoru. [4]

Zásadním problémem, který je třeba v případě statického buzení řešit, je přivedení stejnosměrného budicího proudu na rotor generátoru. K tomu jsou využívány bronzové nebo nerezové kroužky připevněné k rotoru, na které kartáče přivádějí budicí proud. Tento způsob je ale spojen s výrazným mechanickým opotřebením kroužků a následně i s nutností servisního zásahu. Zároveň jsou kroužky také výrazně tepelně namáhány, a proto je kontakt v případě velkých budicích proudů rozložen do několika paralelně pracujících kroužků.

3.2 Rotující budiče

3.2.1 Derivační dynamo

Budicí derivační dynamo má rotor umístěný na společné hřídeli s rotorem buzeného alternátoru. Budicí vinutí samotného dynamu je umístěno na statoru. Komutátor dynamu usměrňuje proud, který je následně přenášen do budicího vnutí generátoru. Při tomto uspořádání opět dochází k mechanickému a tepelnému namáhání komutátoru a je také nezbytný sekundární budič pro nabuzení samotného derivačního dynamu. [4]

3.2.2 Bezroužkové buzení

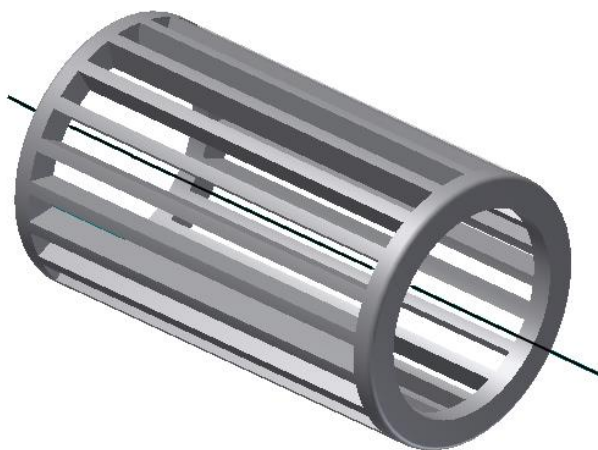
Problém s mechanickým a tepelným opotřebením kroužků řeší rotující budicí soustavy. Tento způsob je využíván nejčastěji u velkých strojů s výkony v řádu jednotek MVA. Vyžaduje však umístění usměrňovače přímo na hřídel stroje, což s sebou nese značné požadavky na mechanické vlastnosti usměrňovače. Zároveň je třeba zajistit, aby byl měnič přístupný případným nezbytným servisním zásahům. V tomto případě se k buzení používá invertovaný

4 TLUMICÍ VINUTÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ

Tlumicí vinutí synchronních strojů je přídavné vinutí, které není nezbytně nutné pro provoz stroje, ale může v provozu plnit několik pomocných funkcí, díky kterým je v praxi často využíváno. Těmito funkcemi mohou být: [5] [7]

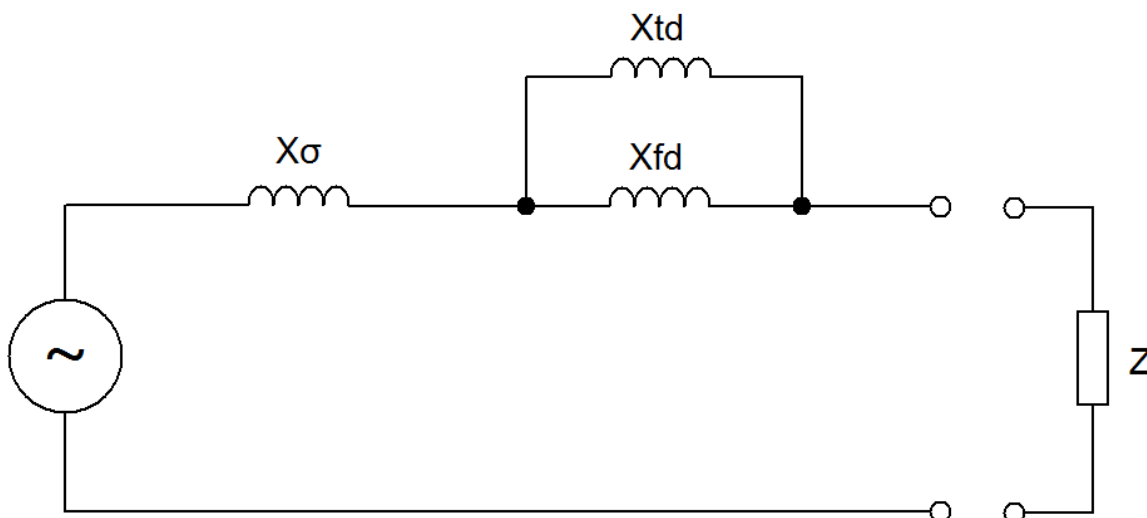
- Tlumení výkyvů výkonu a točivého momentu – vliv na statickou stabilitu.
- Potlačení vyšších harmonických složek magnetického pole ve vzduchové mezeře.
- Ochrana budicího vinutí.
- Omezení vlivu přechodných jevů například při náhle změně zátěže.
- Asynchronní rozběh synchronního stroje.

Na schematickém uspořádání vinutí synchronního na obrázku 2-2 funkci tlumicího vinutí plní vinutí D a Q. Tlumicí vinutí bývá tvořeno měděnými tyčemi, které jsou na obou koncích spojeny na krátko kruhovými prstenci. Konstrukce je znázorněna na obrázku 4-1. Tato klec je pak umístěna do drážek rotoru (v případě strojů s vyniklými póly do pólových nástavců rotorů). Na tlumicí vinutí jsou kladeny vysoké nároky na mechanickou a tepelnou odolnost, protože v nich mohou být indukovány velké proudy (například při přechodných jevech způsobených náhlou změnou zátěže nebo při zkratech), které způsobí značné tepelné i mechanické namáhání. V extrémních případech může dojít až k úplnému zničení vinutí. [5] [7] [8]



Obrázek 4-1 Konstrukce tlumicího vinutí

Vliv tlumicího vinutí na synchronní generátor lze znázornit na zjednodušeném obvodovém modelu stroje. V tomto případě tlumicí vinutí snižuje celkovou reaktanci a indukčnost v příslušné ose. Díky snížené indukčnosti bude menší i časová konstanta soustavy a dojde tak k rychlejšímu ustálení přechodného děje. Situace je naznačena na obrázku 4-2. [5]

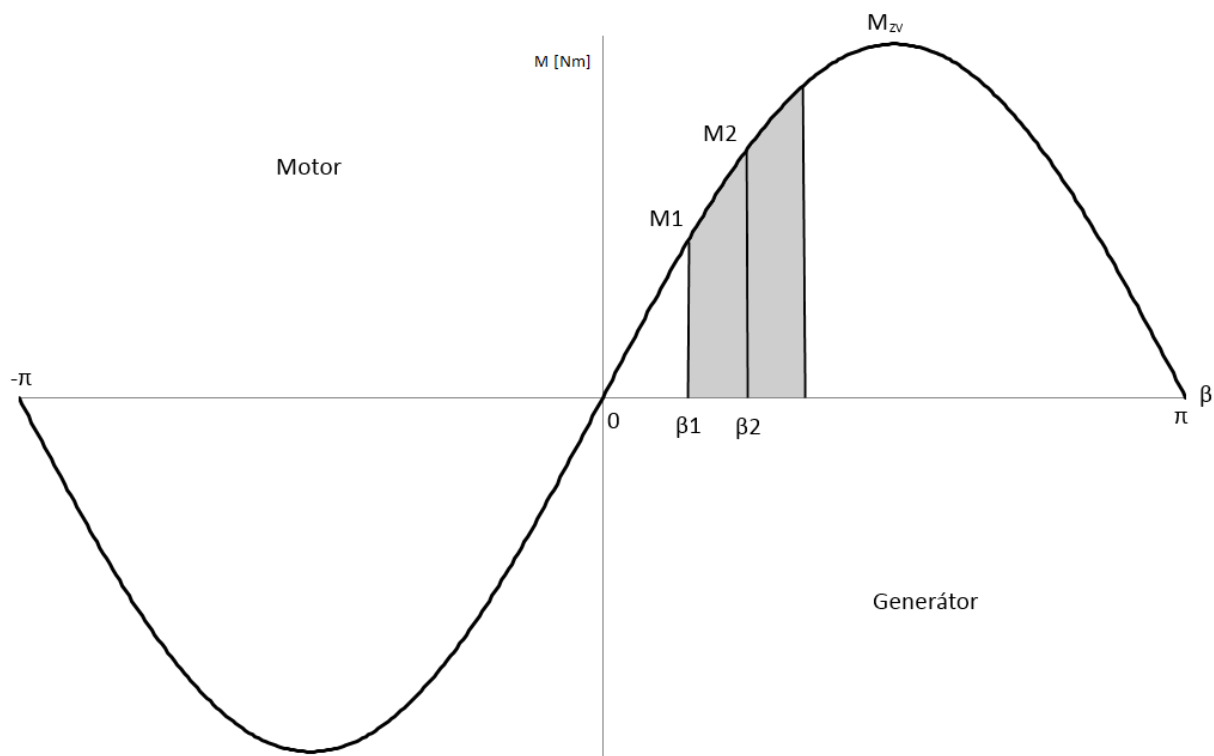


Obrázek 4-2 Obvodové schéma v ose d synchronního generátoru s tlumicím vinutím [5]

4.1 Vliv tlumicího vinutí na stabilitu při přechodných dějích

Jednou z nejvýraznějších poruch, která může při provozu synchronního stroje nastat, je výpadek ze synchronismu. V praxi to znamená, že zátěžný úhel β překročí v absolutní hodnotě 90° a stroj musí být následně odstaven. K tomu může dojít při přechodných dějích způsobených například změnou mechanické zátěže u motoru nebo u generátoru zvýšením dodávaného momentu poháněcím strojem v případě, že již bylo dosaženo maximálního možného přenášeného výkonu. V tom případě dojde k urychlení soustavy a generátor může vypadnout ze synchronismu. [5] [6]

Tyto jevy lze popsat na závislosti momentu na hřídeli na zátěžném úhlu β (viz obrázek 4-2). V případě zvýšení momentu dojde i ke změně zátěžného úhlu, nicméně vlivem setrvačnosti hmot rotoru se soustava ihned neustálí v novém rovnovážném stavu, ale dojde k překmitu na vyšší úhel β . V této situaci ovšem dojde k nedostatku momentu na hřídeli, rotor začne zpomalovat a sníží se i úhel β pod hodnotu rovnovážného stavu. K tomuto kmitání dojde několikrát. K výpadku ze synchronismu by došlo v případě, že by překmit způsobil posun v závislosti $M = f(\beta)$ za hodnotu momentu zvratu M_{zv} . Tlumicí vinutí v tomto případě omezuje velikost překmitů díky indukci proudů, které následně působí proti těmto přechodným jevům. [5] [6] [9]



Obrázek 4-3 Závislost momentu na hřídeli na zátěžném úhlu [6]

5 TRANSIENTNÍ A SUBTRANSIENTNÍ REAKTANCE

O transientní a subtransientní reaktanci mluvíme v případě rychlých změn, jako jsou například zkraty v systému, v němž synchronní generátor pracuje. V ustáleném chodu stroje pracujícího naprázdno je reaktance kotvy dána pouze součtem rozptylové reaktance a reaktance reakce kotvy. Na vznik zkratu však reagují rotorová vinutí, což se projeví demagnetizačním účinkem na stator a vytlačením hlavního magnetického toku do cest rozptylového toku, díky čemuž je statorová reaktance dočasně snížena. Za předpokladu, že reakce tlumicího vinutí odezní výrazně rychleji než reakce budicího vinutí, můžeme rozdělit zkrat na rázový děj, kterému odpovídá subtransientní reaktance, a na přechodný děj, kterému odpovídá transientní reaktance. Po odeznění přechodného děje se pak stroj vrací do ustáleného chodu na krátko. [9]

Dočasný vliv tlumicího a budicího vinutí na reaktanci kotvy lze znázornit obvodovými modely znázorněnými na obrázcích 5-1 a 5-2. Pro úplnost je na obrázku 5-3 uveden i obvodový model při ustáleném chodu. Z těchto schémat je pak zřejmý způsob stanovení hodnot transientní reaktance X'_d a subtransientní reaktance X''_d dle rovnic 5-1 a 5-2. Pro úplnost je uveden i vztah 5-3 odpovídající ustálenému stavu a podélné synchronní reaktanci X_d . Uvedená schémata a vztahy platí pro vinutí v ose d. V ose q je situace odlišná, protože ve většině případů je budicí vinutí umístěno v ose d. V důsledku toho se pak transientní reaktance v ose q X'_q rovná příčné reaktanci v ustáleném stavu X_q (viz rovnice 5-4) a subtransientní reaktance v ose q X''_q je dána součtem rozptylové reaktance a paralelní kombinací reaktance kotvy v ose q a reaktancí danou reakcí tlumicího vinutí (viz rovnice 5-5). [9]

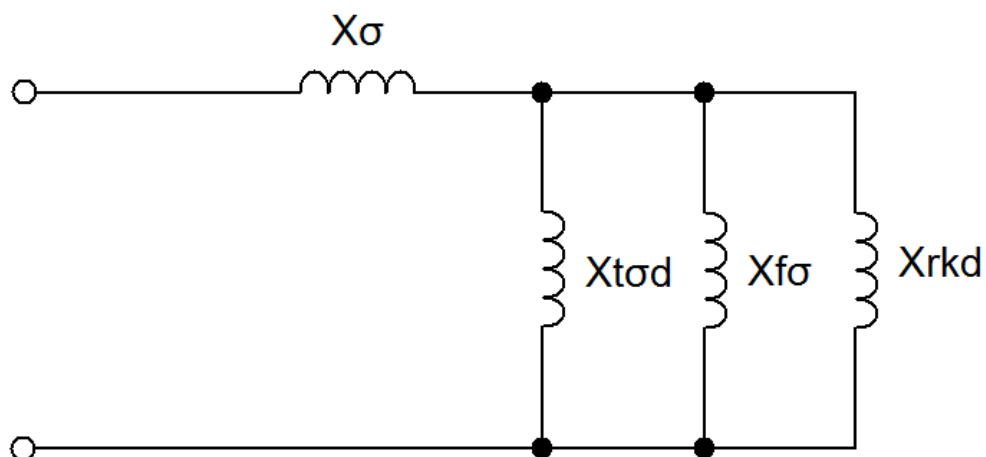
$$X''_d = X_\sigma + \frac{1}{X_{rk} + X_{f\sigma} + X_{t\sigma}} \quad 5-1$$

$$X'_d = X_\sigma + \frac{1}{X_{rk} + X_{f\sigma}} \quad 5-2$$

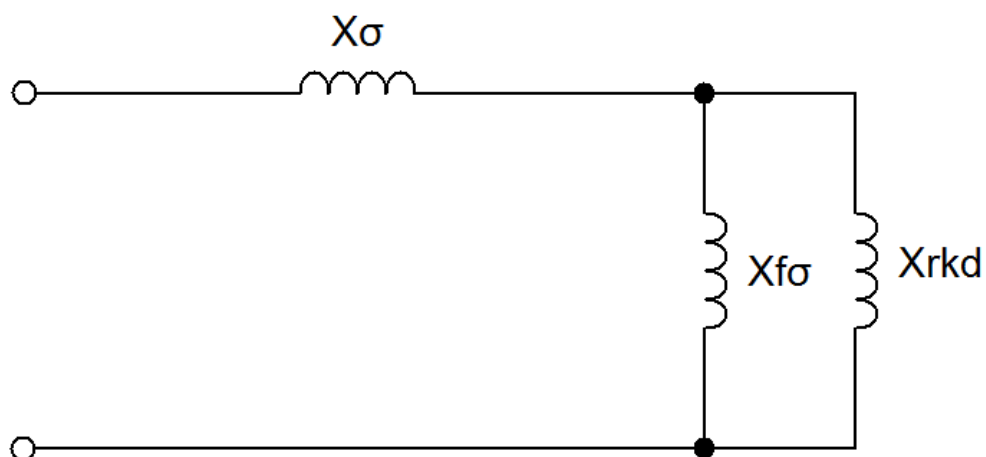
$$X_d = X_\sigma + X_{rk} \quad 5-3$$

$$X'_q = X_q = X_\sigma + X_{rkq} \quad 5-4$$

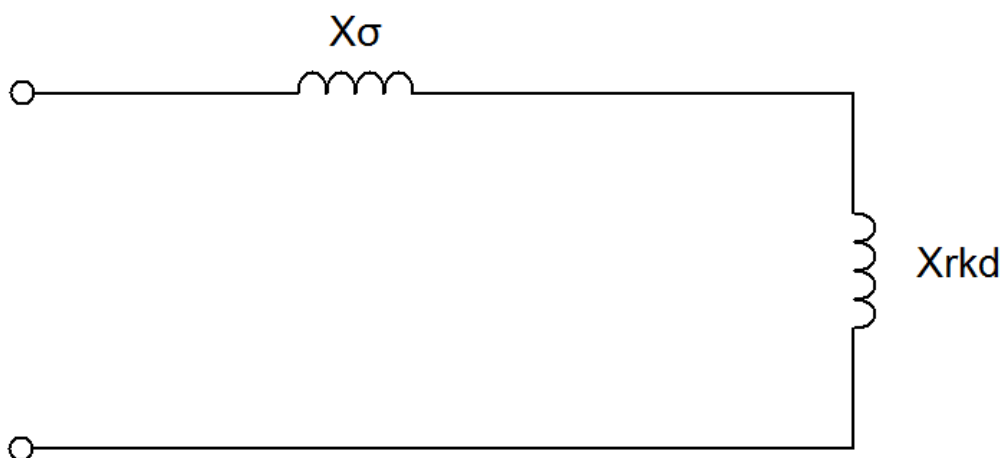
$$X''_q = X_\sigma + \frac{1}{X_{rkq} + X_{t\sigma q}} \quad 5-5$$



Obrázek 5-1 Obvodový model vinutí v ose d při rázovém ději. [9]



Obrázek 5-2 Obvodový model vinutí v ose d při přechodném ději. [9]



Obrázek 5-3 Obvodový model vinutí v ose d při ustáleném chodu. [9]

6 VÝPOČET ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI ZMĚNĚ ZÁTĚŽE

Při náhlé změně zátěže synchronního generátoru dojde k přechodnému jevu, který způsobí krátkodobou změnu napětí. Na tento přechodný děj reaguje regulátor buzení, který změnou budicího proudu dosáhne návratu výstupního napětí na ustálenou hodnotu. Pro analýzu tohoto přechodného děje využijeme program MATLAB a jeho nástavbu Simulink s knihovnou SimPowerSystems, která obsahuje předdefinovaný model synchronního generátoru. Pro regulaci buzení budou využity bloky založené na regulátorech doporučených normou „*IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*“.

6.1 Parametry synchronního generátoru

Pro názorné simulace bude využit blok „*Synchronous Machine pu Standard*“. Jeho parametry jsou zadány v poměrných jednotkách. Stejně tak regulační blok využívá pro své vstupy a výstupy veličiny v tomto systému. Bude použit 4pólový stroj o zdánlivém výkonu 200 MVA, jmenovitém napětí 13,8 kV a jmenovité frekvenci 50 Hz. Model bude zjednodušen mechanickým pohonem realizovaným konstantními otáčkami. Pro přehlednost budou hodnoty reaktancí a odporu statoru přepočteny i do systému jednotek SI. Přepočet vychází ze vztažné impedance určené ze zdánlivého výkonu a jmenovitého napětí dle vztahu 6-1.

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{13800^2}{200 \cdot 10^6} = 0,9522 \, \Omega \quad 6-1$$

Hodnoty jednotlivých parametrů pak lze stanovit podle rovnice 6-2. Pro ukázkou je uveden výpočet odporu statoru v jednotkách SI v rovnici 6-3. Hodnoty reaktancí a dalších parametrů jsou uvedeny v souhrnné tabulce 6-1. Jmenovité otáčky lze určit z frekvence stroje a počtu pólů stroje dle vztahu 6-4.

$$Z = Z_{(pu)} \cdot Z_n \quad 6-2$$

$$R_s = R_{s(pu)} \cdot Z_n = 2,8544 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9522 = 2,718 \, m\Omega \quad 6-3$$

$$n = \frac{50 \cdot f}{2p} = \frac{50 \cdot 60}{4} = 750 \, \text{min}^{-1} \quad 6-4$$

Tabulka 6-1 Parametry použitého synchronního generátoru

Veličina	Hodnota v jednotkách SI	Hodnota pu
S_n	200 MVA	1
U_n	13 800 V	1
f	50 Hz	1
n	750 min ⁻¹	1
Z_n	0.9522 Ω	1
R_s	2,7180 m Ω	$2,8544 \cdot 10^{-3}$
X_d	1,2426 Ω	1,305
X_d'	281,85 m Ω	0,296
X_d''	239,95 m Ω	0,252
X_q	451,34 m Ω	0,474
X_q''	231,38 m Ω	0,243
X_l	171,40 m Ω	0,18
T_d'	1,01 s	-
T_d''	0,053 s	-
T_{qo}''	0,1 s	-

Zdroj: Autor

6.2 Simulace v MATLAB Simulink

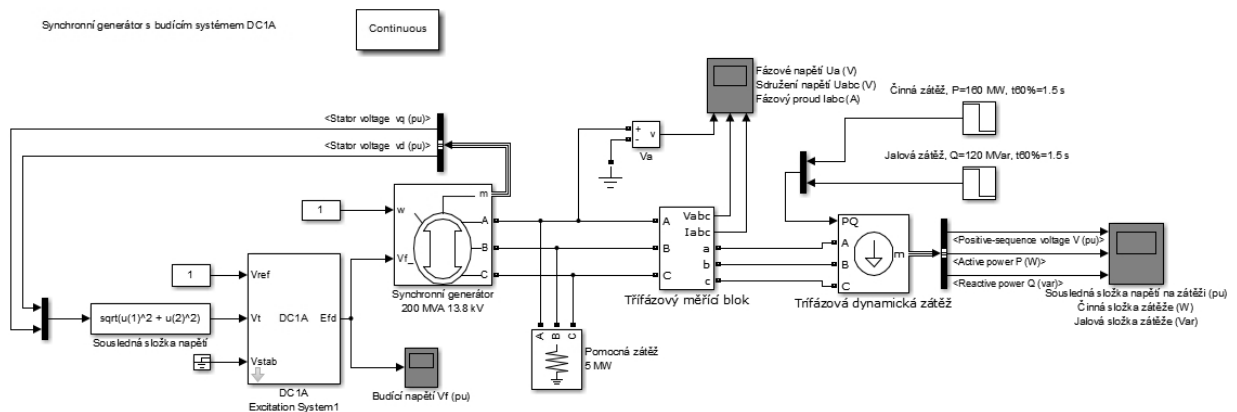
Pro simulaci přechodného děje při náhlé změně zátěže generátoru bylo použito schéma znázorněné na obrázku 6-1. Konkrétně se jedná o zapojení s budicím systémem DC1A, který bude blíže popsán v následujícím textu. Schémata zapojení s dalšími budicími systémy lze nalézt v přílohách. K synchronnímu generátoru je jako model ostrovní síť připojen blok dynamické zátěže 200 MVA s účinníkem $\cos \varphi = 0,8$. Činná i jalová složka zátěže je v čase 1,5 s skokově snížena na 60 %. Tuto operaci zajišťují dva bloky *Step*. Signály z těchto bloků jsou spojeny do jednoho vektoru, který je dále předán bloku dynamické zátěže. K hlavní zátěži je paralelně připojena činná pomocná zátěž o velikost 5 MW, protože MATLAB Simulink neumožňuje přímé připojení induktivní zátěže ke generátoru.

Regulace napětí probíhá pomocí budicího systému DC1A. Jako referenční hodnota napětí je zvolena jmenovitá hodnota napětí v pu. Pro účely zjištění skutečné hodnoty napětí jsou z generátoru vyvedeny signály statorových napětí v ose d a q, které jsou následně vektorově sečteny a vzniklá sousledná složka statorového napětí je předána jako vstupní hodnota budicímu systému. Stabilizační napětí není použito, proto je poslední vstup budicího systému pouze uzemněn.

Pro účely analýzy jsou pak do systému zařazeny tři bloky *Scope*, které umožňují zobrazit časový průběh budicího napětí v pu, průběhy fázového a sdruženého napětí na výstupních svorkách generátoru ve voltech, fázový proud v ampérech, časový průběh zatížení činnou i jalovou složkou a průběh sousledné složky napětí na zátěži v poměrných jednotkách, na které bude následně demonstrován průběh přechodného jevu při změně zátěže.

Analýza pomocí metody souměrných složek je běžně využívána v praxi. Sousedné složky napětí mají stejný sled fází jako zkoumaná svorková napětí, přičemž základ mohou tvořit jak fázová, tak i sdružená napětí. Zároveň také platí, že jejich velikosti jsou shodné pro všechny tři fáze a liší se pouze posunem o 120° . Pro jednotlivé vektory sousledné složky tak lze psát závislost na fázovém napětí dle vztahů 6-5, kde U_a je amplituda fázového nebo sdruženého napětí. Z těchto vztahů a díky tomuto poznatku je patrné, že analýzu úbytku nebo nárůstu napětí při změně zátěže lze provádět sledováním amplitudy pouze jednoho ze tří vektorů sousledné složky napětí. V systému souměrných složek doplňují souslednou složku ještě zpětná a nulová složka, které jsou však v symetrické soustavě (symetrický zdroj i zátěž) nulové, což lze předpokládat právě u prováděné analýzy změny zátěže. Při analýze nesymetrických zkratů však již soustavu za symetrickou považovat nelze. V ustáleném stavu v symetrické soustavě má tedy sousledná složka napětí shodnou hodnotu jako sdružené napětí, což v systému poměrných jednotek odpovídá jedničce. [11]

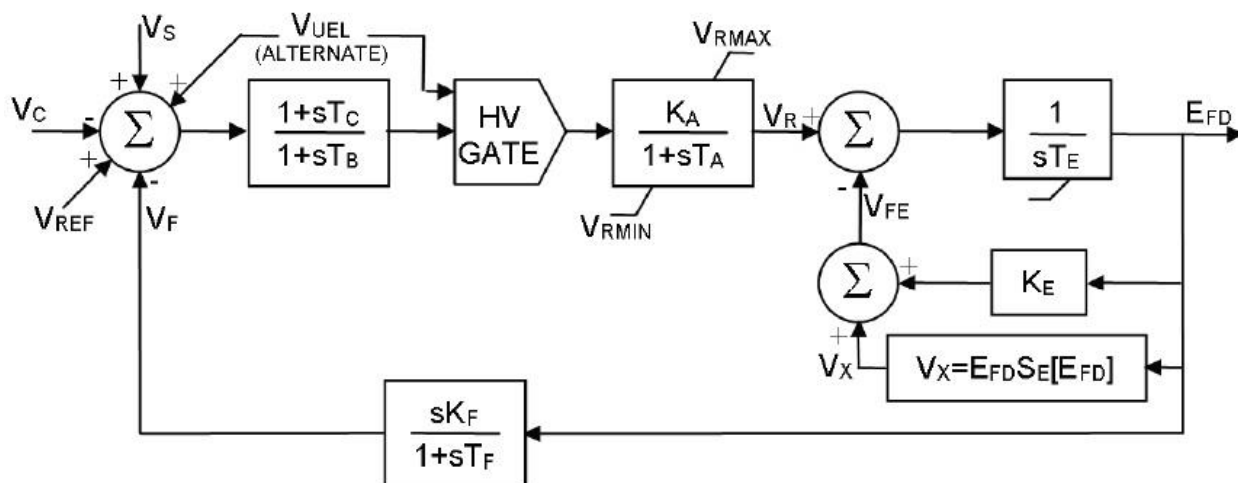
$$U_{aU} = U_a, U_{aV} = a^2 U_a, U_{aW} = a U_a \quad 6-5$$



Obrázek 6-1 Schéma zapojení modelu s budičím systémem DC1A

6.3 Simulace s budičím systémem DC1A

Schéma budičeho systému DC1A je znázorněno na obrázku 6-2. Kromě referenční a skutečné hodnoty napětí a na vstupu modelu působí ještě vnější stabilizační napětí a stabilizační zpětná vazba. V ustáleném stavu jsou ale tyto dvě hodnoty nulové. Model předpokládá zdroj energie nezávislý na krátkých přechodných dějích hlavního stroje. Časové konstanty T_b a T_c mohou být použity pro zahrnutí vlastních časových konstant regulátoru, mohou také ale být vzhledem ke své velikosti zanedbány. Samotná regulace je pak reprezentována zesílením K_a a časovou konstantou T_a . Blok obsahuje i budič, který je řízen regulačním napětím V_r . Výstupem celého systému je pak budič napětí pro hlavní stroj. [10]



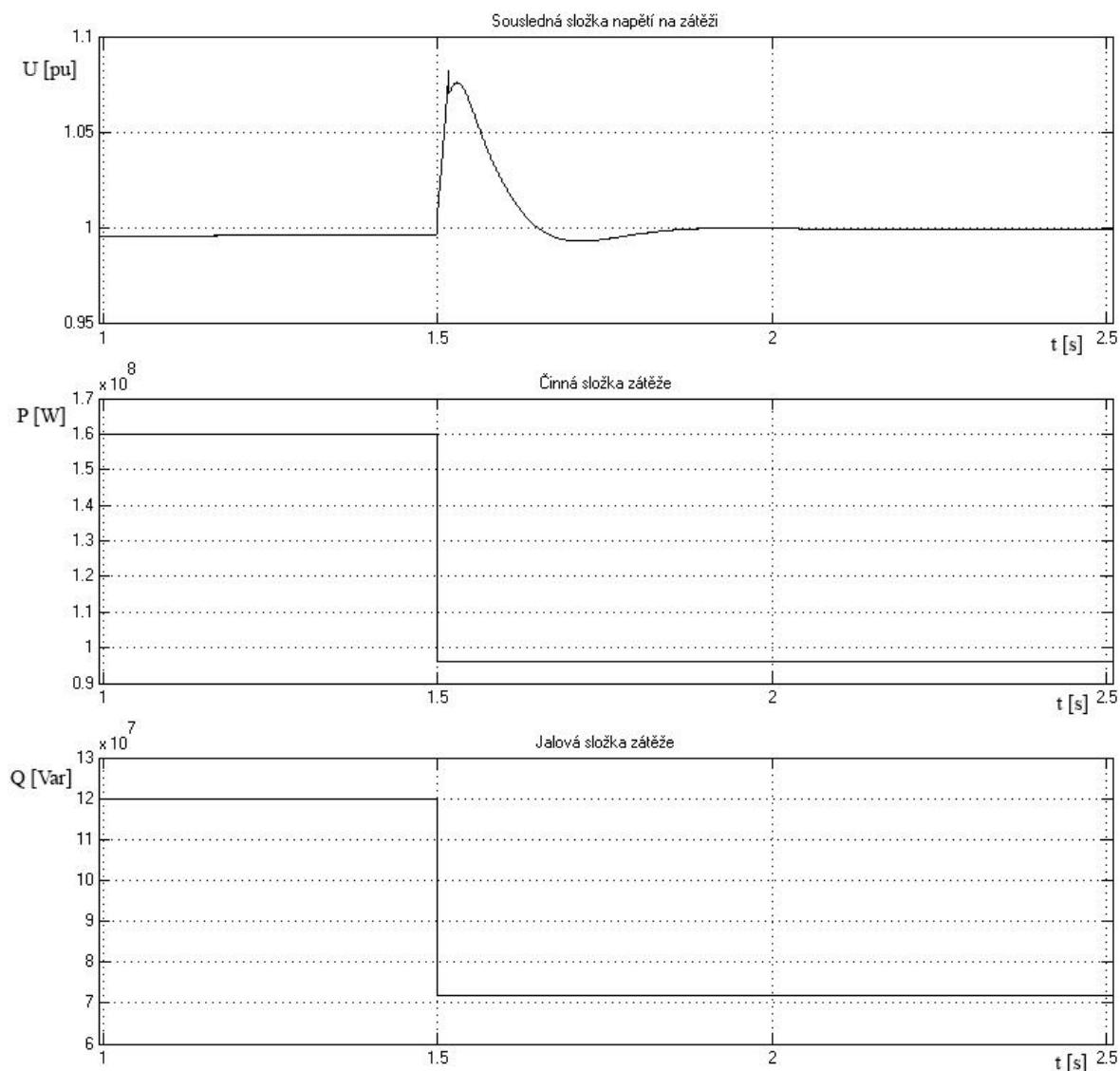
Obrázek 6-2 Schéma budicího systému DC1A. Převzato z [10].

Parametry regulačního bloku použité při simulaci jsou uvedeny v tabulce 6-2. Simulace průběhu napětí při poklesu zátěže na 60 % s využitím regulačního bloku DC1A je znázorněna na obrázku 6-3.

Tabulka 6-2 Parametry budicího systému DC1A

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
T_r	20 ms		
K_a	300	T_a	1 ms
V_{Rmin}	-11,5 pu	V_{Rmax}	11,5 pu
K_f	0,02	T_f	1,5 s
K_e	0,1	T_e	0,1 ms
E_{fd1}	3,1 pu	E_{fd2}	2,3 pu
S_{eEfd1}	0,33 pu	S_{eEfd2}	0,1 pu

Zdroj: Autor

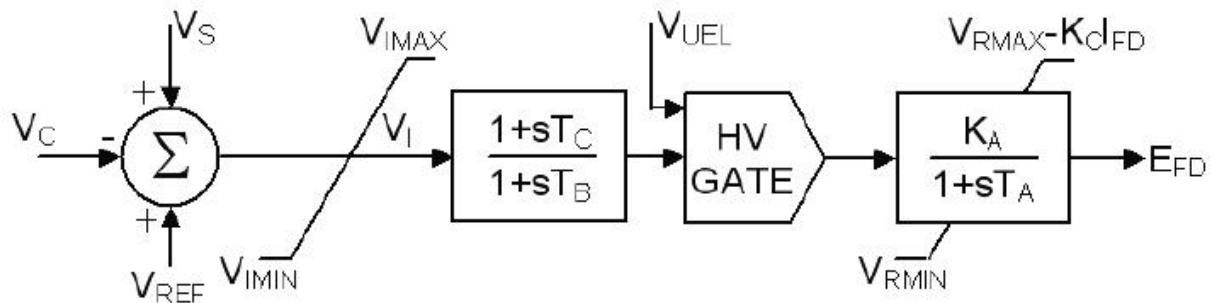


Obrázek 6-3 Simulace změny napětí při poklesu zátěže na 60 % s regulací DC1A

Z průběhu napětí je patrné, že při odlehčení zátěže došlo k překmitu napětí o cca 7,65 % nad jmenovitou hodnotu, následně došlo k dalšímu cca 0,65% překmitu pod jmenovitou hodnotu a poté se přechodný děj ustálil na jmenovité hodnotě po 0,4 s od odlehčení.

6.4 Simulace s budicím systémem AC4A

Zdrojem energie pro budicí systém AC4A je alternátor s řízeným tyristorovým usměrňovačem. Alternátor je řízen tak, aby na jeho výstupních svorkách bylo vždy konstantní napětí. Hlavní regulátor systému pak řídí spínání tyristorů, čímž dochází k regulaci buzení hlavního stroje. Řízení alternátoru a spínání tyristorů však není v samotném modelu přímo zastoupeno. Úbytek napětí na usměrňovači reprezentuje zesílení K_c , které se v kombinaci proudem rotoru I_{fd} promítne do horního výstupního limitu hlavního regulátoru. Tento blok tedy v prostředí programu Simulink obsahuje ještě vstup právě pro proud rotoru. Schéma tohoto budicího systému je znázorněno na obrázku 6-4. [10]



Obrázek 6-4 Schéma budicího systému AC4A. Převzato z [10].

Při simulaci s budicím systémem AC4A bude na rozdíl od předchozího případu použito skokové zvýšení zátěže z počáteční úrovně 60 % na 100 % hodnotu v čase 1,5 s. Parametry budicího systému použité při simulaci jsou uvedeny v tabulce 6-3. V rámci této simulace bude zanedbán úbytek napětí na usměrňovači. Průběh této simulace je znázorněn na obrázku 5-5 a blokové schéma zapojení lze nalézt v příloze A.

Tabulka 6-3 Parametry budicího systému AC4A

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
T_r	20 ms	K_c	0
K_a	900	T_a	1 ms
V_{Rmin}	-10 pu	V_{Rmax}	10 pu
V_{Imin}	-10 pu	V_{Imax}	10 pu
T_b	10 s	T_c	1 s

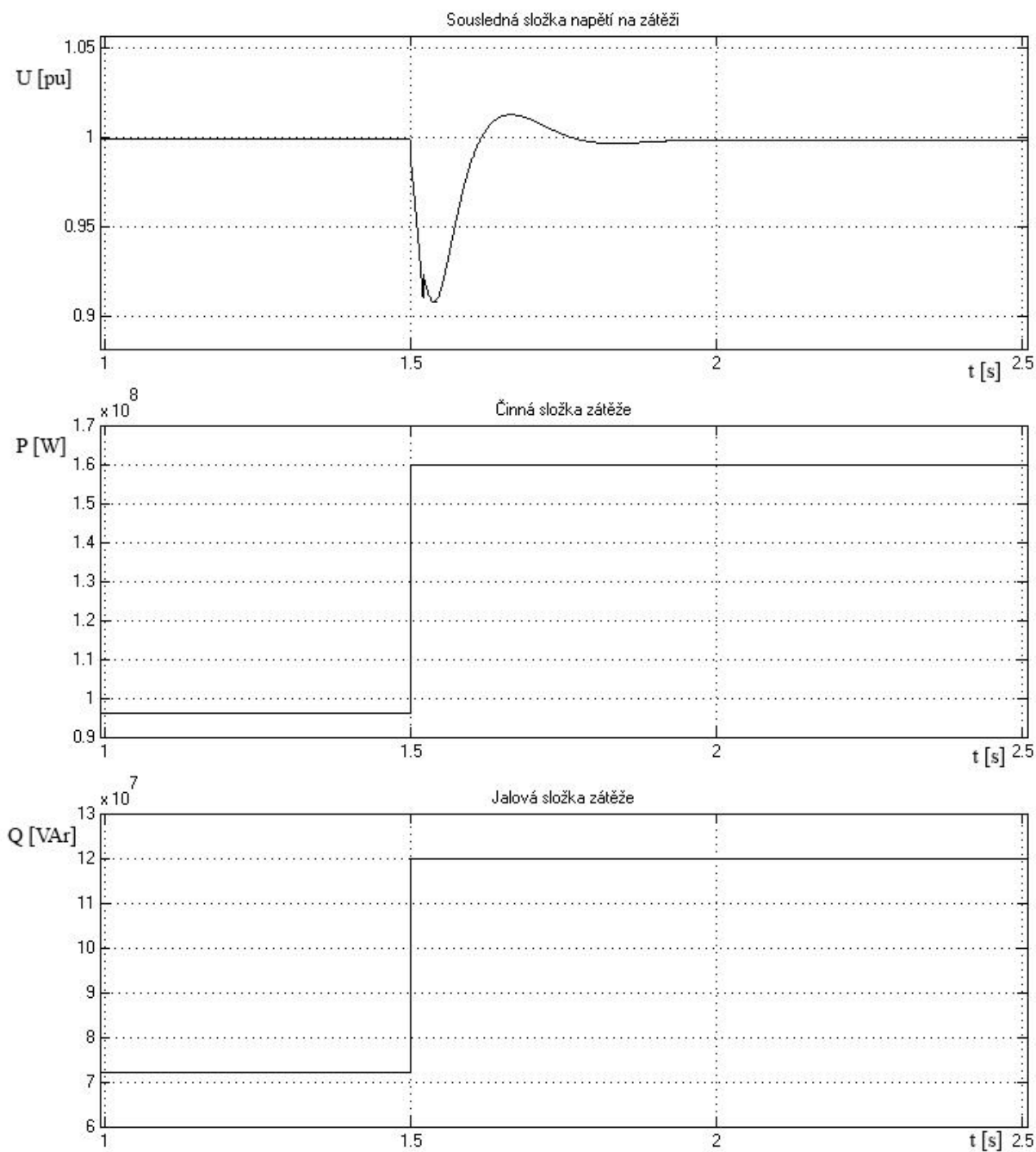
Zdroj: Autor

Po skokovém nárůstu zátěže došlo k poklesu napětí o 9,17 %, následně k překmitu nad jmenovitou hodnotu o 1,25 % a přechodný jev se ustálil po přibližně po 0,43 s od změny zátěže. Snížením zesílení hlavního regulátoru lze dosáhnout stavu, kdy nedojde k žádnému překmitu napětí nad jmenovitou hodnotu, nicméně tato změna bude mít za následek prodloužení přechodného jevu. Simulace se změněnými parametry regulačního bloku je znázorněna na obrázku 6-5, samotné upravené nastavení regulátoru je uvedeno v tabulce 6-4.

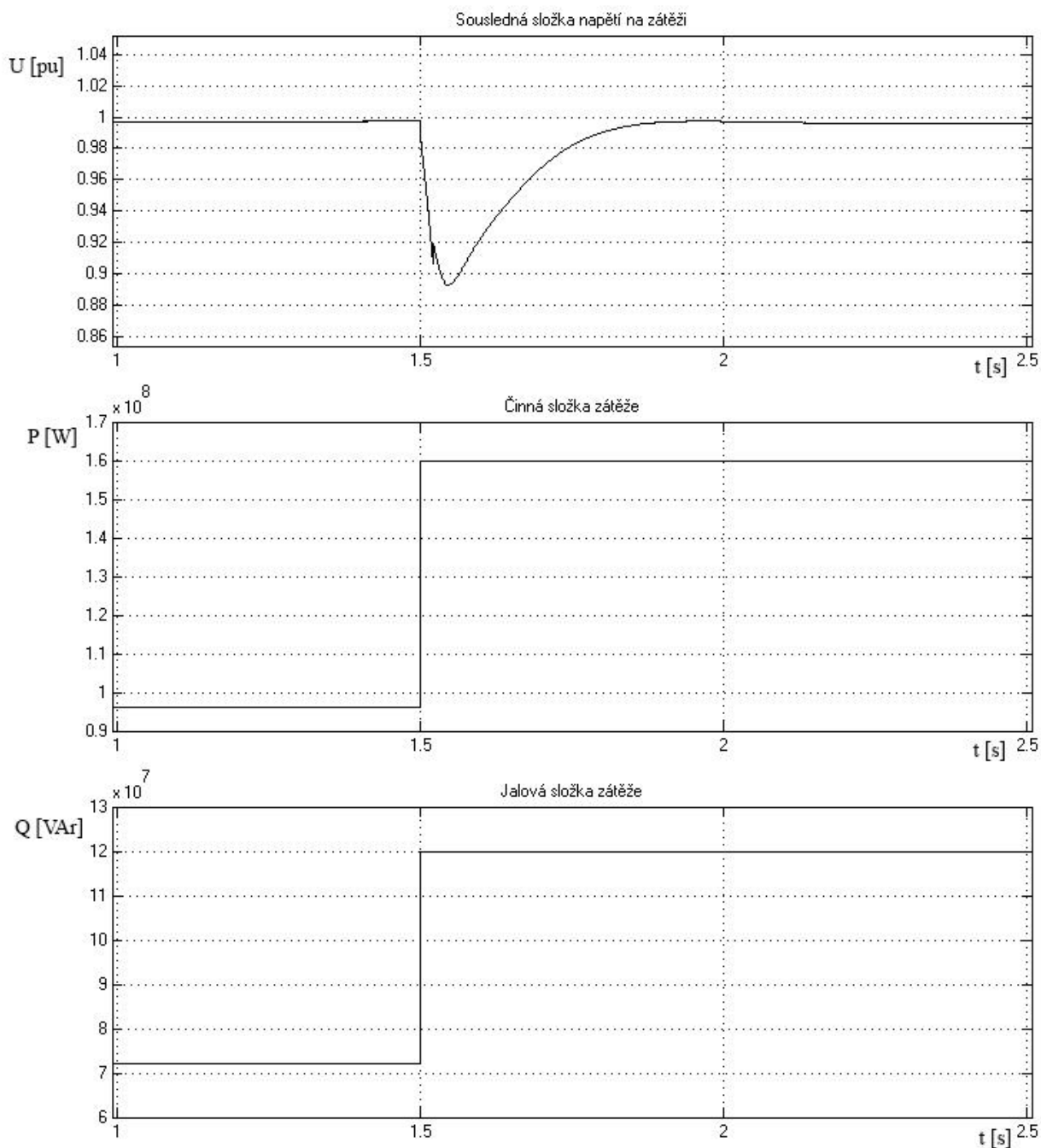
Tabulka 6-4 Upravené parametry budicího systému AC4A

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
T_r	20 ms	K_c	0
K_a	300	T_a	1 ms
V_{Rmin}	-10 pu	V_{Rmax}	10 pu
V_{Imin}	-10 pu	V_{Imax}	10 pu
T_b	10 s	T_c	1 s

Zdroj: Autor



Obrázek 6-5 Simulace změny napětí při nárůstu zátěže z 60 % na 100 % s regulací AC4A



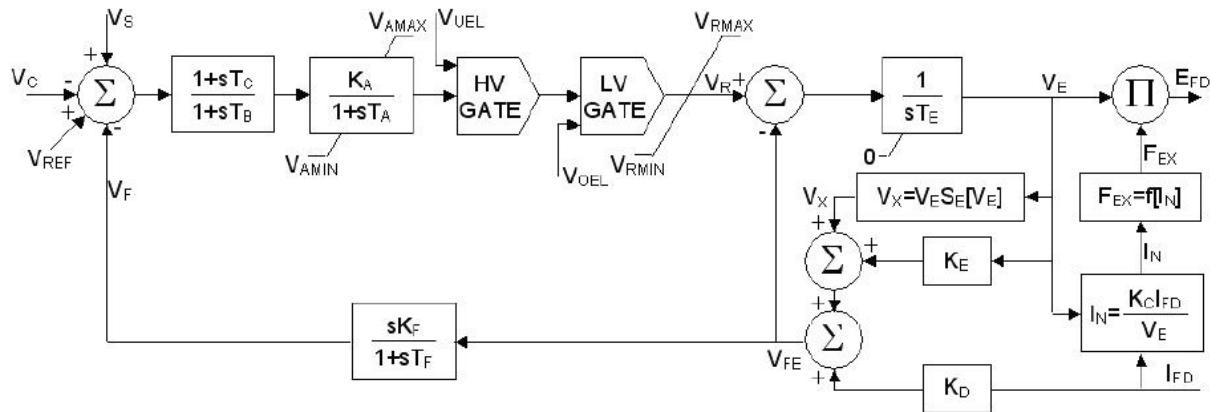
Obrázek 6-6 Simulace změny napětí při nárůstu zátěže z 60 % na 100 % s regulací AC4A s upravenými parametry

Při druhé simulaci s upraveným nastavením budicího bloku došlo k mírnému nárůstu prvního překmitu na 10,73 % a k ustálení došlo přibližně po 1 s od změny zátěže, nicméně nebyl již zaznamenán překmit napětí nad ustálenou hodnotu.

6.5 Simulace s budicím systémem AC1A

Buzení tohoto systému je podobně jako u typu AC4A zajištěno alternátorem s usměrňovačem, který je ovšem v tomto případě neřízený. Podobně jako u typu AC4A vyžaduje

tento blok přivedení signálu rotorového proudu na vstup, který je následně využit pro určení úbytku napětí na usměrňovači. Blokové schéma tohoto budicího systému je znázorněno na obrázku 6-7 a schéma zapojení celého modelu v prostředí MATLAB Simulink je uvedeno v příloze A. [10]



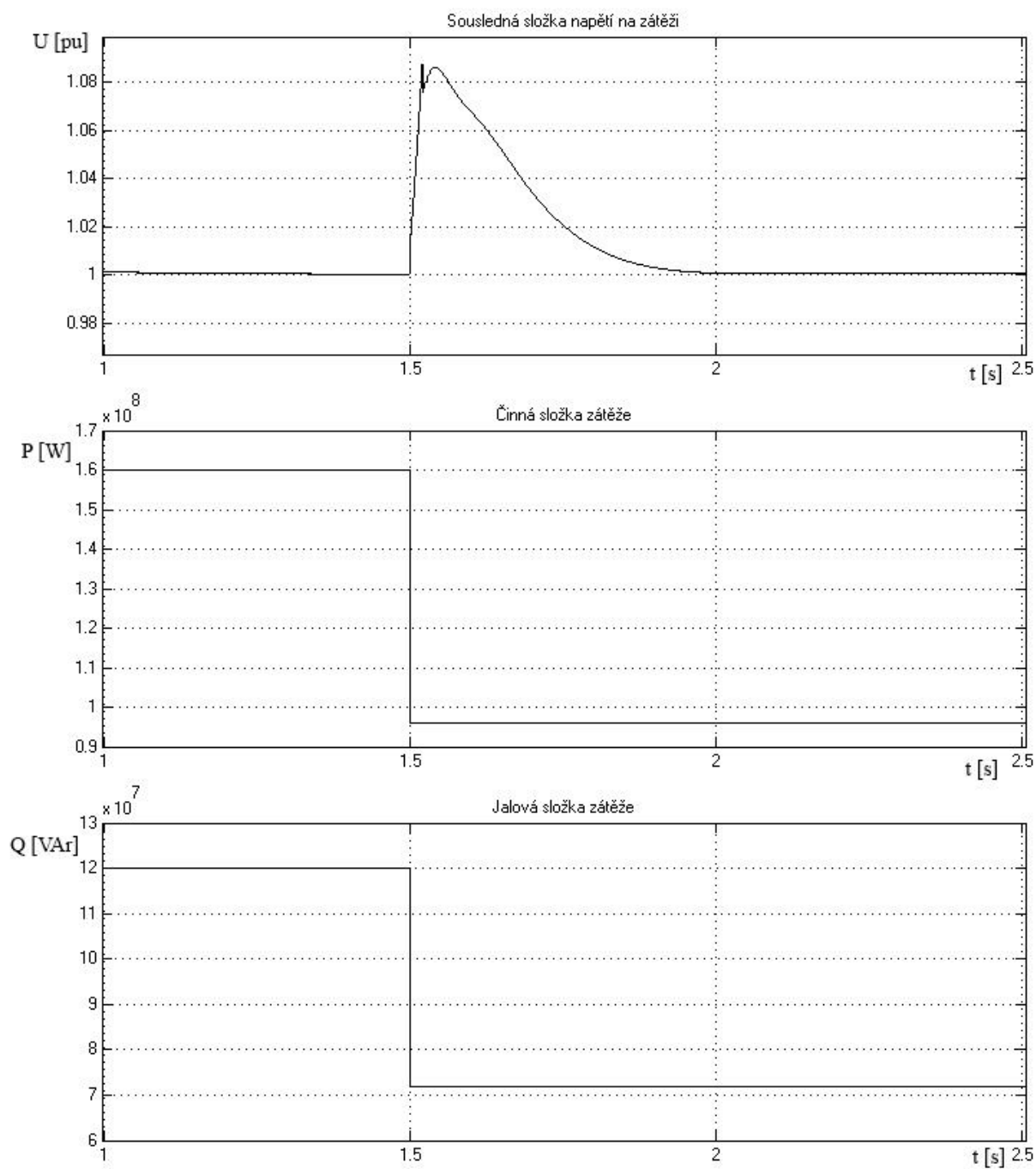
Obrázek 6-7 Schéma budicího systému AC1A. Převzato z [10].

Při simulaci bylo použito nastavení budicího systému dle tabulky 6-5. V tomto případě bylo použito skokové snížení zátěže ze 100 % na 60 % v čase 1,5 s obdobně jako u systému DC1A uvedeného v kapitole 6.1 této práce. Výsledky získané touto simulací jsou uvedeny na obrázku 6-8. Maximální úroveň překmitu napětí dosáhla hodnoty 8,76 % nad jmenovitou hodnotu. V tomto případě již nedošlo k dalšímu překmitu pod jmenovitou úroveň a přechodný jev se ustálil po cca 0,45 s od odlehčení zátěže.

Tabulka 6-5 Parametry budicího systému DC1A

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
T_r	20 ms		
K_a	900	T_a	0,1 ms
V_{Rmin}	-12 pu	V_{Rmax}	12 pu
V_{Amin}	-14,5 pu	V_{Amax}	14,5 pu
K_f	0,03	T_f	1 s
T_b	0 s	T_c	0 s
K_e	1	T_e	0,08 s
V_{e1}	4,18 pu	V_{e2}	3,14 pu
S_{eVe1}	0,1 pu	S_{eVe2}	0,003 pu
K_d	0,01	K_c	0,2

Zdroj: Autor



Obrázek 6-8 Simulace změny napětí při poklesu zátěže ze 100 % na 60 % s regulací DC1A

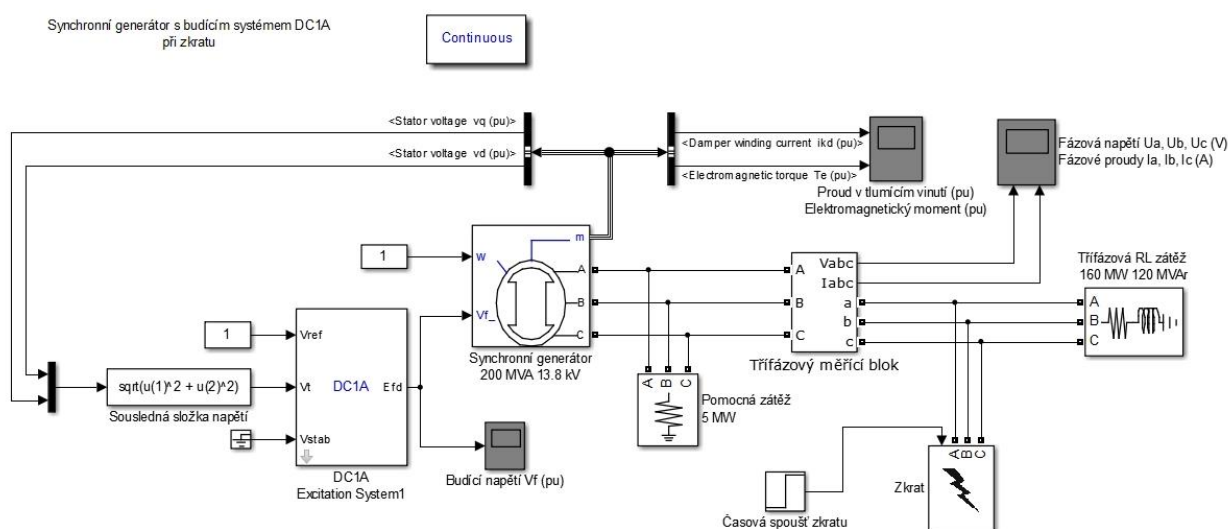
7 SIMULACE ZKRATU SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

Model synchronního generátoru předdefinovaný v programu MATLAB Simplerer při výpočtech využívá i transientní a subtransientní reaktance a jim odpovídající časové konstanty, díky čemuž je možné tento model využít i pro simulaci velmi rychlých přechodných dějů, jako jsou zkraty. Bylo proto sestaveno schéma, které tuto možnost prakticky demonstruje. Zapojení je uvedeno na obrázku 7-1. Nastavení parametrů bylo použito shodné jako u předchozích simulací a je uvedeno v tabulce 6-1. Oproti předchozím simulacím již nebyla použita dynamická zátěž, která byla nahrazena jmenovitou RL zátěží s účínkem $\cos \varphi = 0,8$. Přesné hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce 7-1. Při simulaci bylo nejprve dosaženo ustáleného chodu a následně v čase $t = 1$ s byl iniciován zkrat. Byly sledovány časové průběhy jednotlivých fázových napětí, proudů a dále průběhy proudu tlumicím vinutím v ose d a vnitřní elektromagnetický moment stroje. Na obrázcích 7-2 a 7-3 jsou demonstrovány průběhy právě těchto veličin zjištěné při simulaci třífázového zemního zkratu a na obrázcích 7-4 a 7-5 je prezentována simulace dvoufázového zemního zkratu. Průběhy zmíněných veličin při dalších typech zkratů jsou pak uvedeny v příloze B. Změna typu zkratu není prováděna žádnou změnou v zapojení modelu, bylo pouze upraveno nastavení příslušného bloku reprezentující zkrat. Při těchto simulacích byl využit budicí systém DC1A.

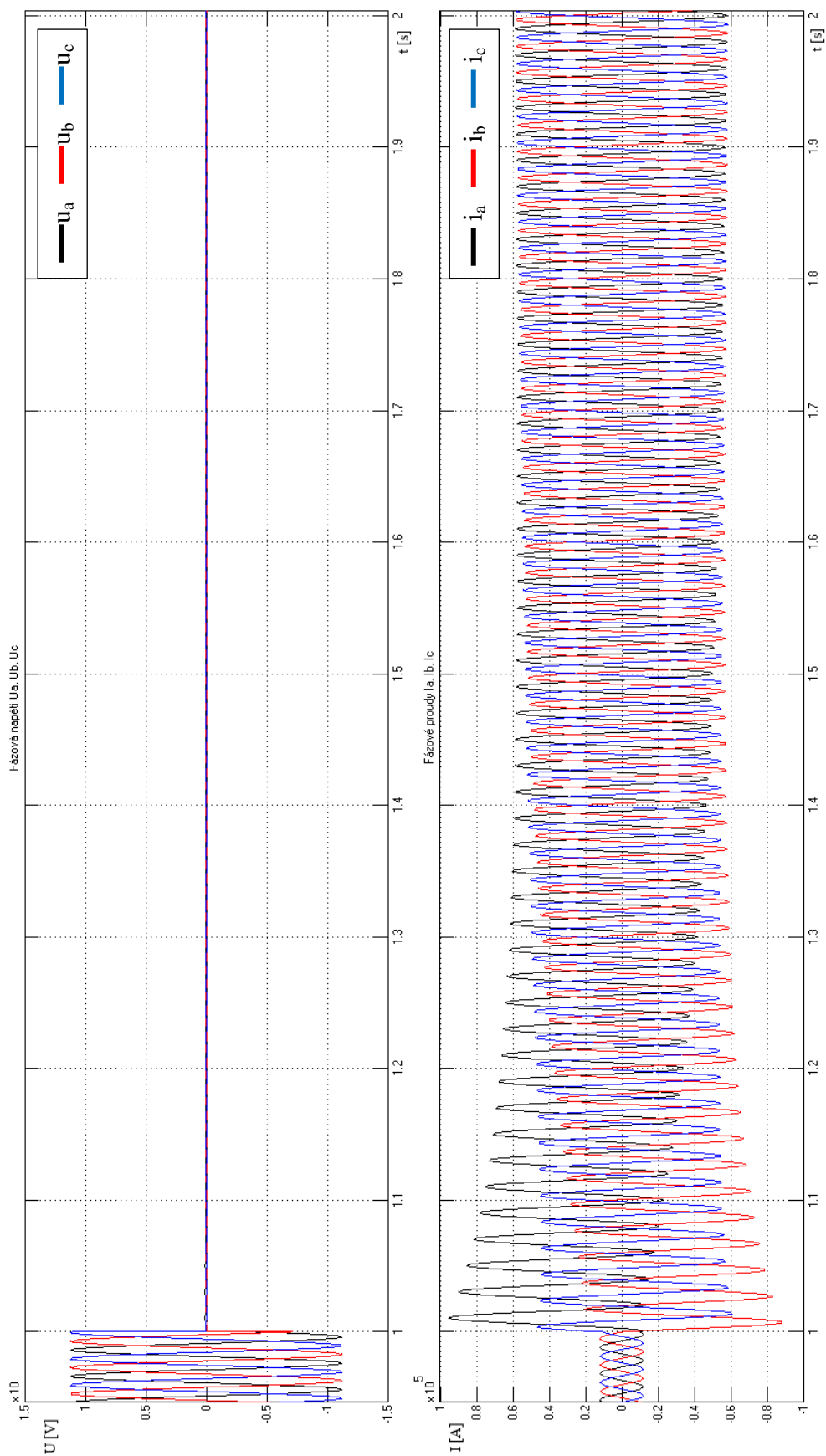
Tabulka 7-1 Parametry zátěže při simulaci zkratů

P [MW]	160
Q [MVar]	120

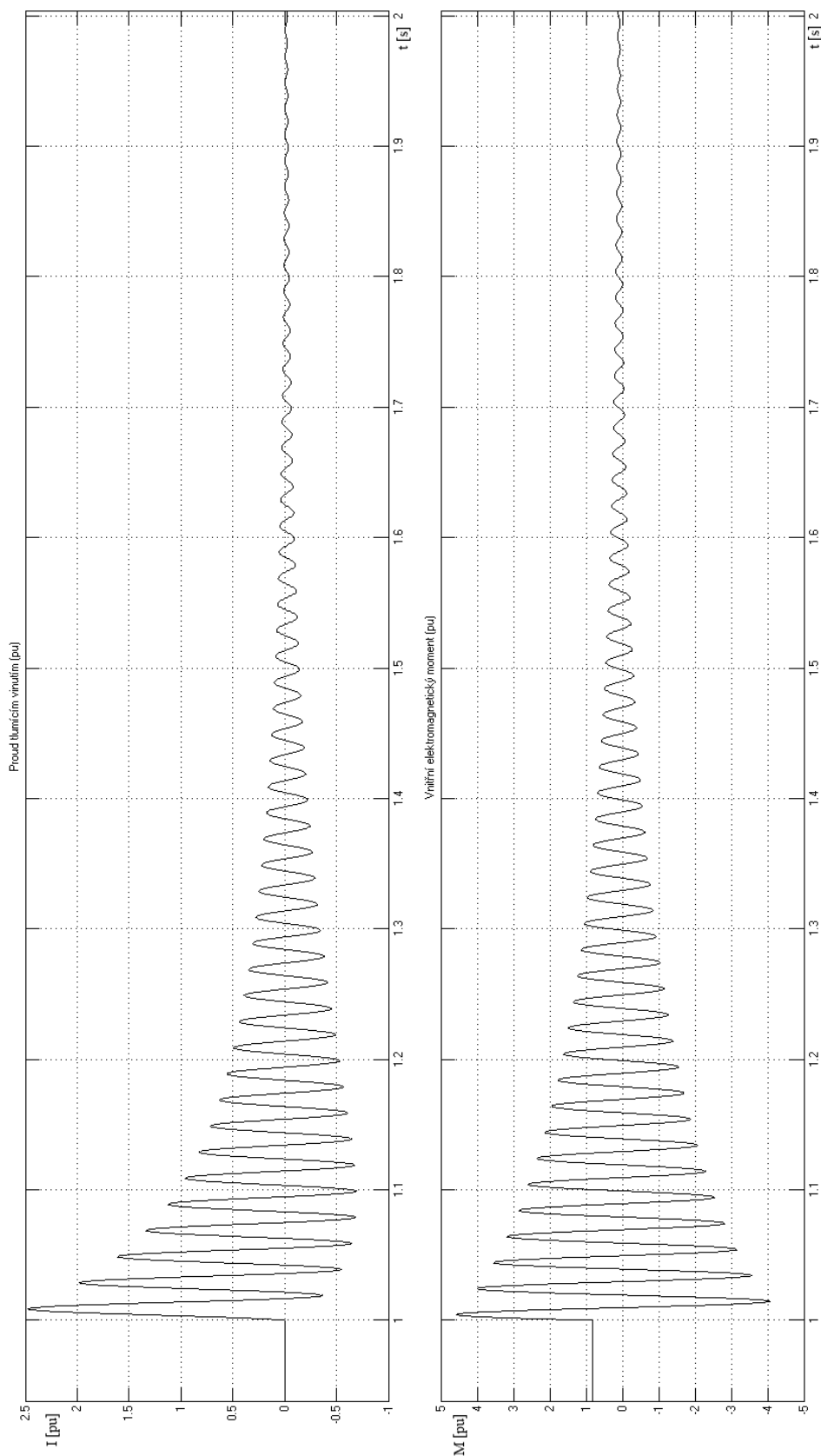
Zdroj: Autor



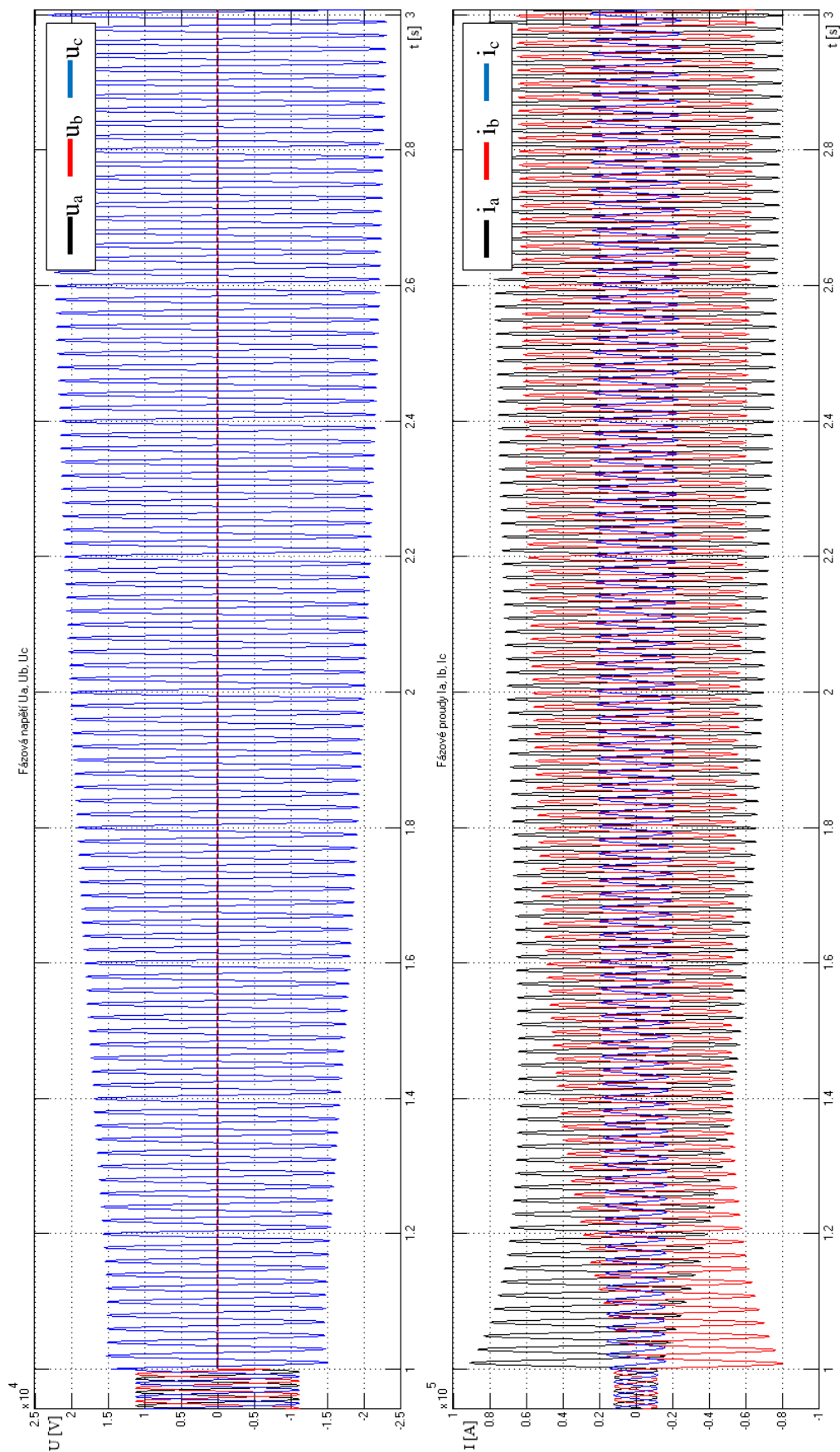
Obrázek 7-1 Schéma zapojení modelu při simulaci zkratů



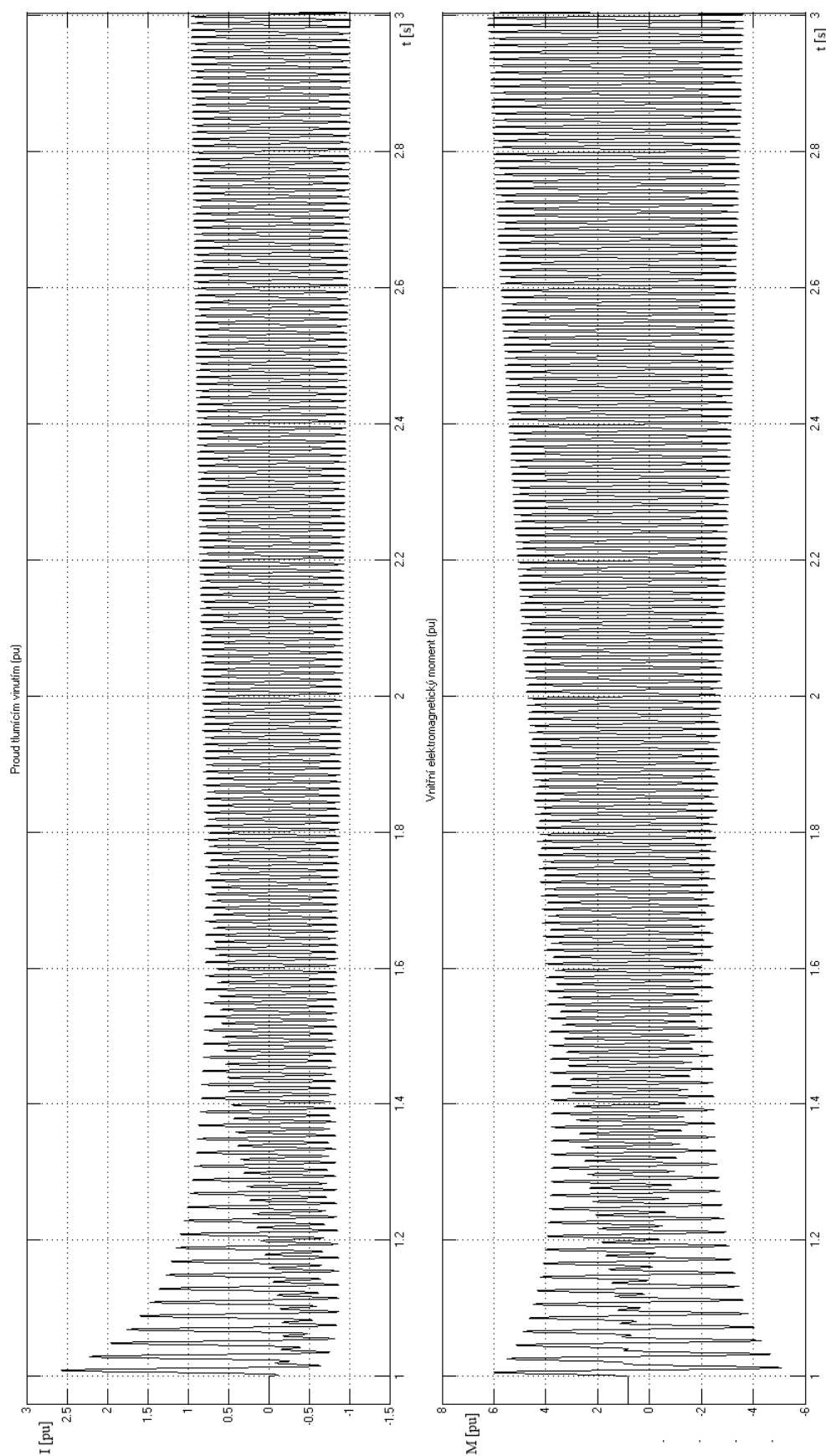
Obrázek 7-2 Průběh fázových napětí a proudů při třífázovém zemním zkratu



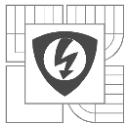
Obrázek 7-3 Průběh proudu tlumicím vinutím a elektromagnetického momentu při třífázovém zemním zkratu



Obrázek 7-4 Průběh fázových napětí a proudů při dvoufázovém zemním zkratu



Obrázek 7-5 Průběh proudu tlumicím vinutím a vnitřní moment při dvoufázovém zemním zkratu



Z grafických průběhů je zřejmý typický průběh zkratů. Nejprve dojde k rychlému rázovému ději, kterému odpovídá nejmenší subtransientní časová konstanta. S odezněním tohoto děje se přestane projevovat subtransientní reaktance a systém přejde do části přechodného jevu, kterému odpovídá transientní časová konstanta a který je ovlivňován transientní reaktancí. Po čase dojde k odeznění i tohoto děje a systém přejde do ustáleného stavu odpovídající novým podmínkám v obvodu, tj. zejména snížené celkové impedanci v důsledku právě zkratování příslušných fází.

Z grafů je patrná i funkce tlumicího vinutí, ve kterém se při náhlé změně v soustavě naindukoval proud přispívající k ustálení jejího stavu. V případě třífázového zemního zkratu následně tlumicí proud klesl až na nulovou hodnotu, v případě dvoufázového zemního zkratu došlo po přechodném ději k ustálení jeho průběhu na periodickém ději s konstantní amplitudou. Rozdíl mezi průběhy proudu tlumicím vinutím při třífázovém a dvoufázovém zemním zkratu je dán nesymetrickým charakterem dvoufázového zkratu. Na průběhu proudu tlumicím vinutím při dvoufázovém zemním zkratu na obrázku 7-5 jsou také velmi dobře patrné vlivy subtransientních a transientních dějů v čase během zkratu. Z grafů je dále patrné, že nejrychleji došlo k ustálení jednofázového zemního zkratu (viz příloha B, obrázek 1 a 2), a to konkrétně za cca 0,5 s. U ostatních typů zkratů se tato doba pohybovala v řádu několika sekund.

8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou přechodných jevů napětí při náhlé změně zatížení synchronního generátoru pracujícího v ostrovním režimu. V první části práce je uveden matematický popis synchronního generátoru v reálné soustavě veličin. Následuje popis obecného elektrického stroje, který slouží jako základ pro analýzu přechodných dějů elektrických strojů. Synchronní generátor je následně transformován pomocí Parkovy metody z reálných veličin do veličin d , q , 0 , které jsou spojeny právě s obecným elektrickým strojem. Tato transformace v praxi umožňuje rychlejší analýzu a regulaci chodu synchronního generátoru. V dalších kapitolách jsou uvedeny různé typy buzení synchronních strojů a stručně je naznačena problematika tlumicího vinutí jakožto prvku stroje snižující dobu trvání přechodných dějů.

V další části práce je provedena samotná analýza přechodných jevů spojených s náhlou skokovou změnou zátěže synchronního děje, konkrétně je zkoumána změna napětí při tomto jevu. Simulace byly prováděny v prostředí programu MATLAB Simulink s využitím knihovny SimPowerSystems. Základem se pak stal synchronní generátor o výkonu 200 MVA pracující se jmenovitým napětím 13,8 kV. Pro regulaci buzení závislé právě na hodnotě výstupního napětí stroje byly použity bloky odpovídající regulačním systémům doporučeným normou „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies“. Model byl realizován v poměrných jednotkách z důvodu snazšího propojení bloku generátoru s regulačním blokem. Poměrné jednotky také umožňují jednodušší analýzu dosažených výsledků a jejich srovnání s různými procentuálními limity stanovenými pro výkyvy napětí při přechodných dějích.

Pro účely této práce byly vybrány tři regulační bloky s označením DC1A, AC1A a AC4A dle výše zmíněné normy IEEE. Se všemi těmito systémy regulace bylo dosaženo podobných výsledků, kdy se překmit napětí pod nebo nad jmenovitou hodnotu pohyboval okolo 9 % a k ustálení přechodné jevu došlo ve všech případech přibližně za 0,4 s.

V rámci této práce se podařilo sestavit v programu MATLAB Simulink univerzální modely, které lze dále využít pro analýzu libovolného synchronního generátoru po zadání parametrů příslušného stroje. Snadno lze modifikovat i způsob a změny zatížení stroje. V případě potřeby lze také budicí bloky použité v rámci této práce nahradit odlišnými typy a provést analýzu. Vytvořené modely jsou přiloženy k této práci na samostatném datovém nosiči.

Na rámec původních cílů byly výše zmíněné modely v programu MATLAB Simulink modifikovány a bylo sestaveno schéma určené k simulování různých tipů zkratů na synchronním generátoru. Funkčnost takto sestaveného modelu následně byla ověřena několika simulacemi při konstantním zatížení s využitím budicího systému DC1A.

LITERATURA

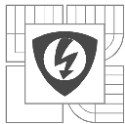
- [1] MĚŘIČKA, Jiří a Zdeněk ZOUBEK. *Obecná teorie elektrického stroje*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973, 162 s.
- [2] ONDRŮŠEK, Čestmír. 2. *Elektrické stroje*. Brno, elektronická přednáška.
- [3] NĚMEC, Jan a Čestmír ONDRŮŠEK. *Návrh rotujícího usměrňovače pro synchronní bezkroužkové generátory výkonů v jednotkách MVA*. Elektrevue. 27.9.2007, roč. 2007, č. 34, s. 6. ISSN 1213-1539.
- [4] HORNÍK, V. *Regulace buzení synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D.
- [5] CHROBÁK, P. *Možnosti přímého připojení synchronního generátoru s permanentními magnety na síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [6] CHROBÁK, P. *Dynamický model a odbuzení bezkartáčového synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [7] Traxler-Samek, G.; Lugand, T.; Schwery, A., "Calculation of power losses in the damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions," *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, vol., no., pp.1,6, 6-9 Sept. 2008 doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800068,
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4800068&isnumber=4799813>
- [8] Jovanovski, S.B., "Calculation and Testing of Damper-Winding Current Distribution in a Synchronous Machine with Salient Poles," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol.PAS-88, no.11, pp.1611,1619, Nov. 1969 doi: 10.1109/TPAS.1969.292367
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4073761&isnumber=4073756>
- [9] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Praha 6 : ČVUT, 1993. 311 s. ISBN 80-01-01020-1.
- [10] IEEE. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies* [online]. IEEE Std 421.5-2005. New York, 2006 [cit. 2014-05-25]. ISBN 0-7381-4787-7 SS95364. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1626480>
- [11] SEDLÁČEK, Jiří a Juraj VALSA. FEKT VUT V BRNĚ. *Elektrotechnika II*. 3. přeprac.vyd. Brno: Vutium, 2004, 143 s. ISBN 80-214-2573-3.



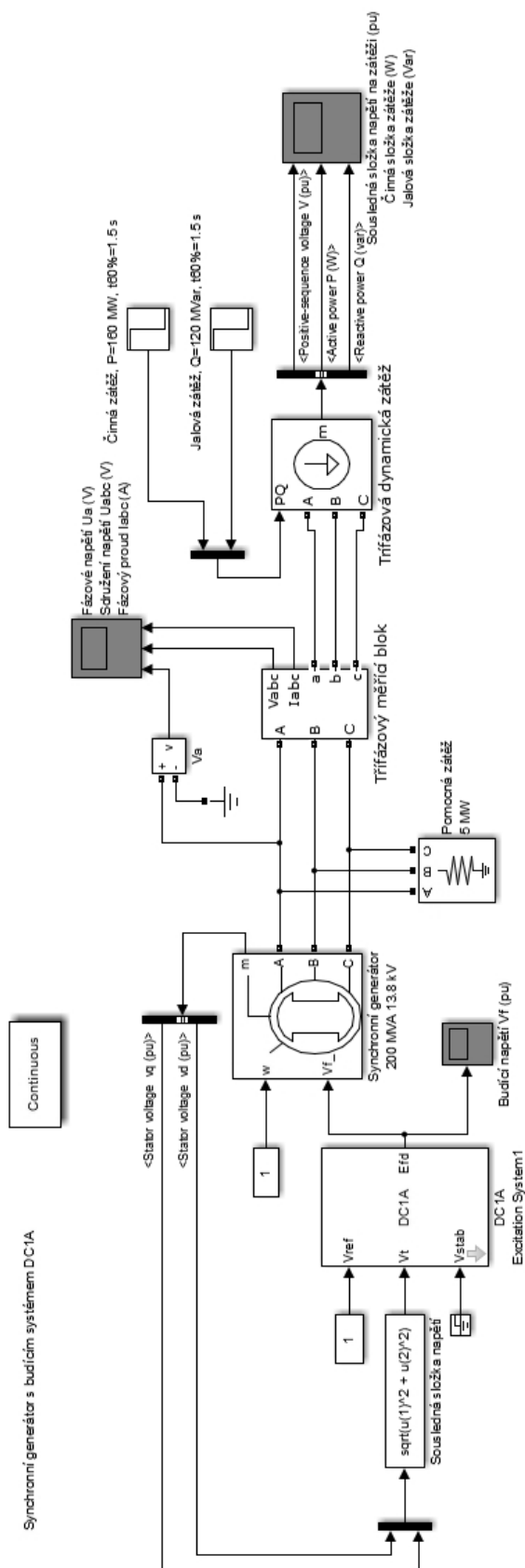
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: SCHÉMATA ZAPOJENÍ MODELŮ V MATLAB SIMULINK

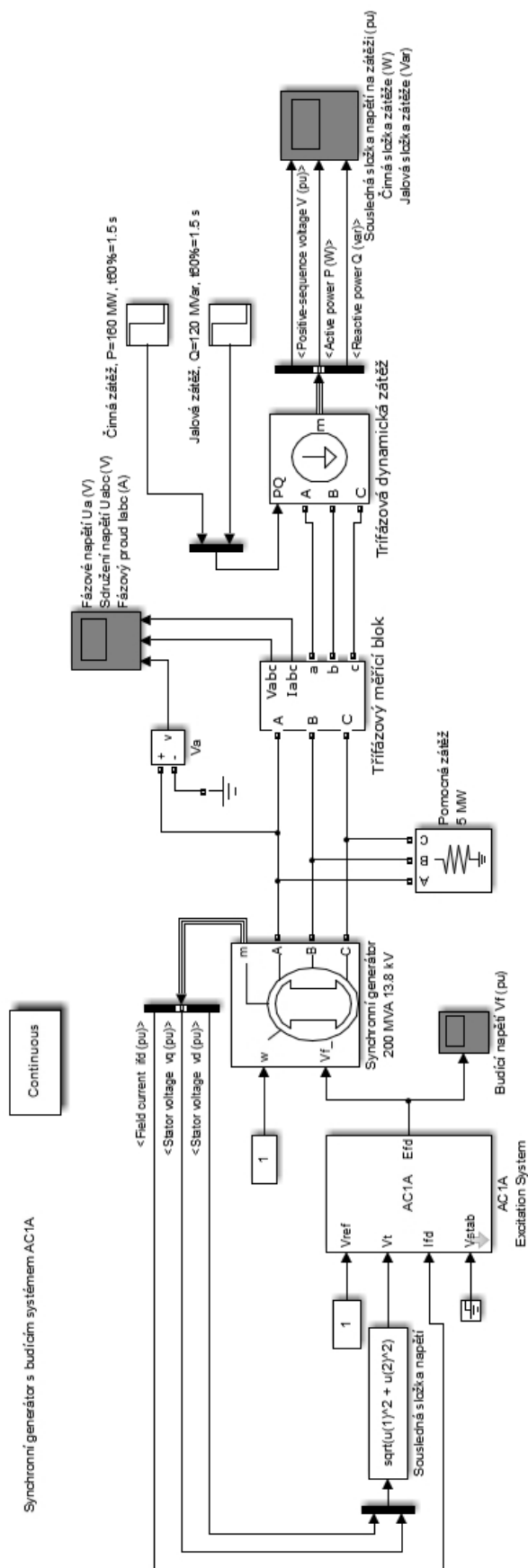
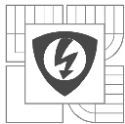
PŘÍLOHA B: SIMULACE ZKRATŮ NA SYNCHRONNÍM GENERÁTORU



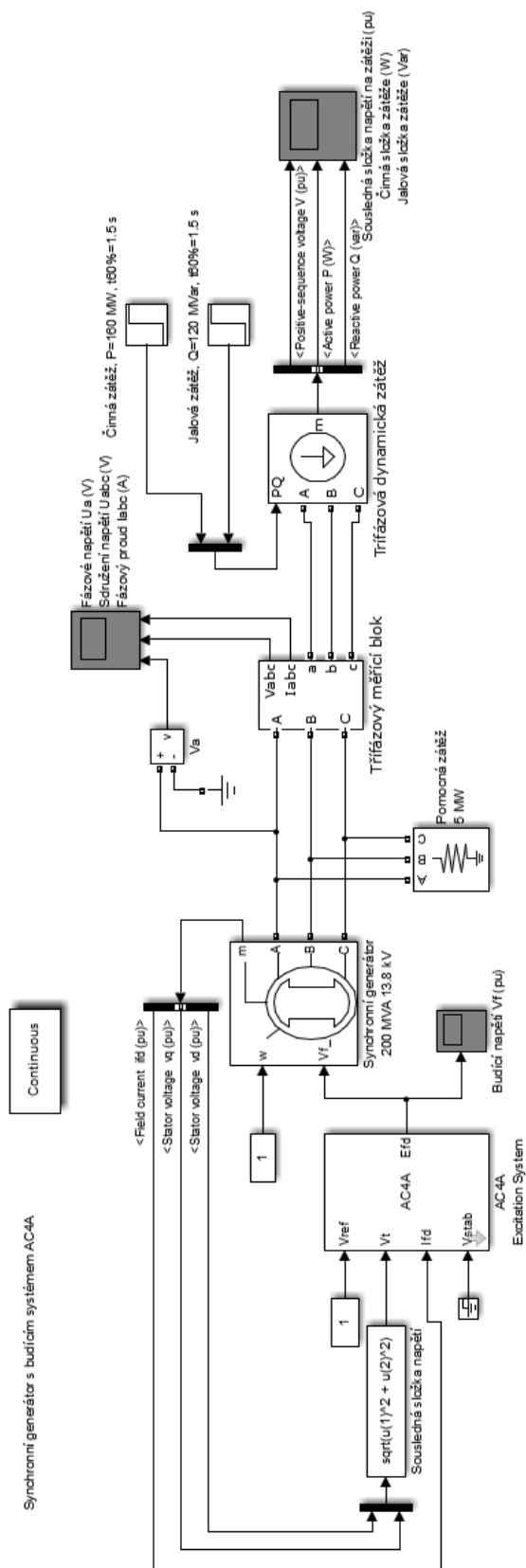
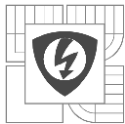
PŘÍLOHA A: SCHÉMATA ZAPOJENÍ MODELŮ V MATLAB SIMULINK



Obrázek 1 Schéma zapojení modelu s budícím systémem DC1A

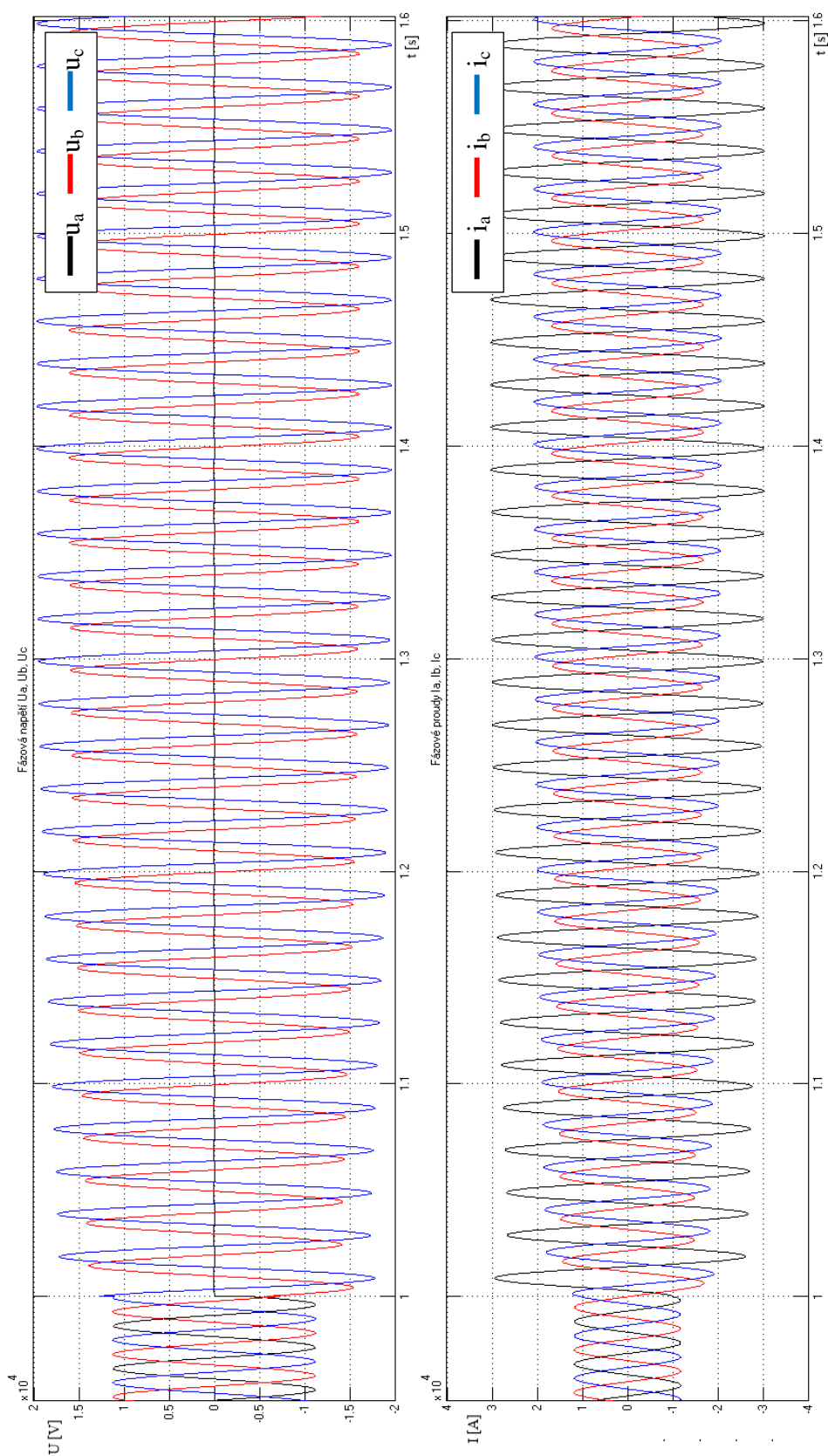


Obrázek 2 Schéma zapojení modelu s budícím systémem AC1A

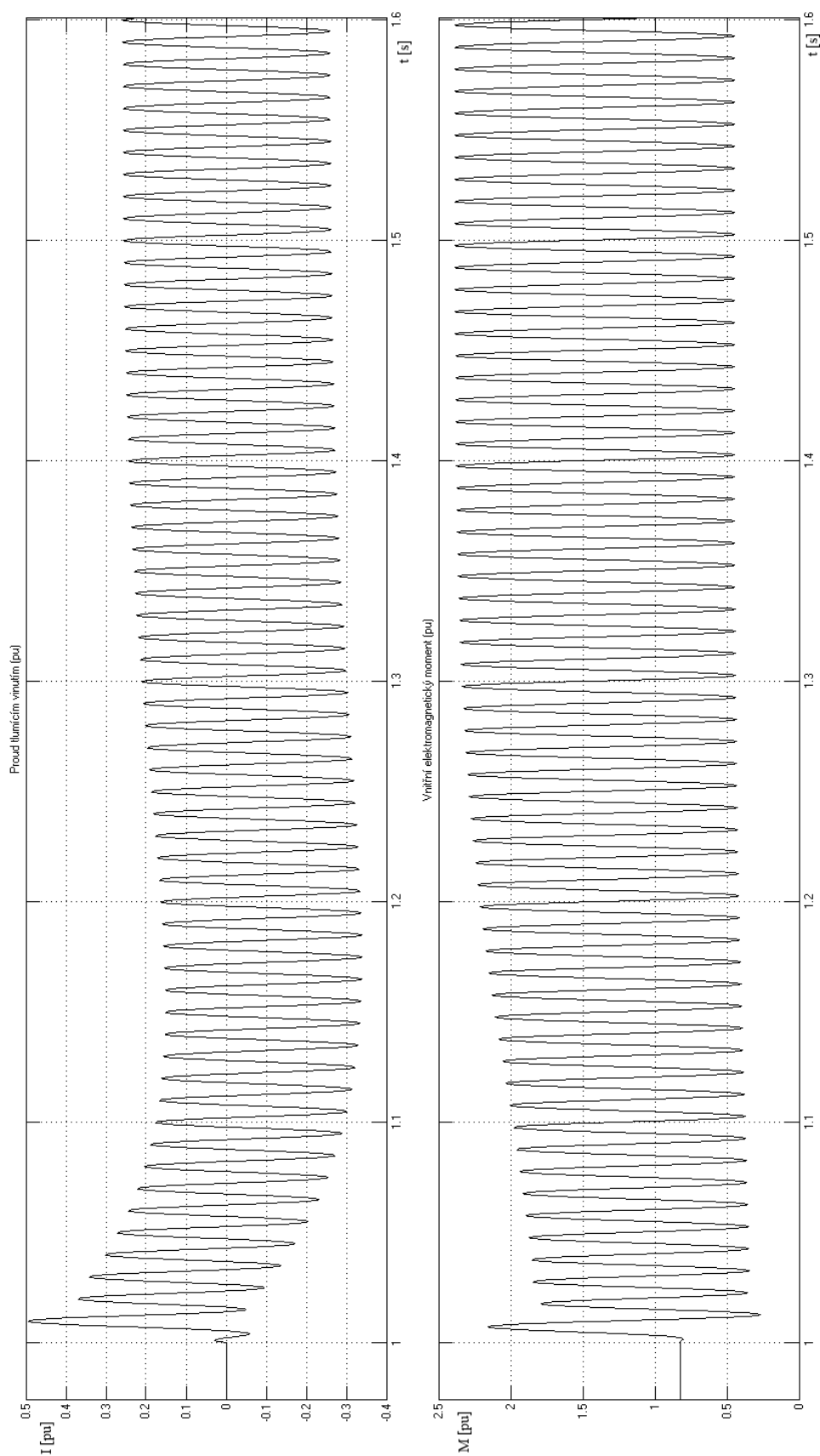


Obrázek 3 Schéma zapojení modelu s budícím systémem AC4A

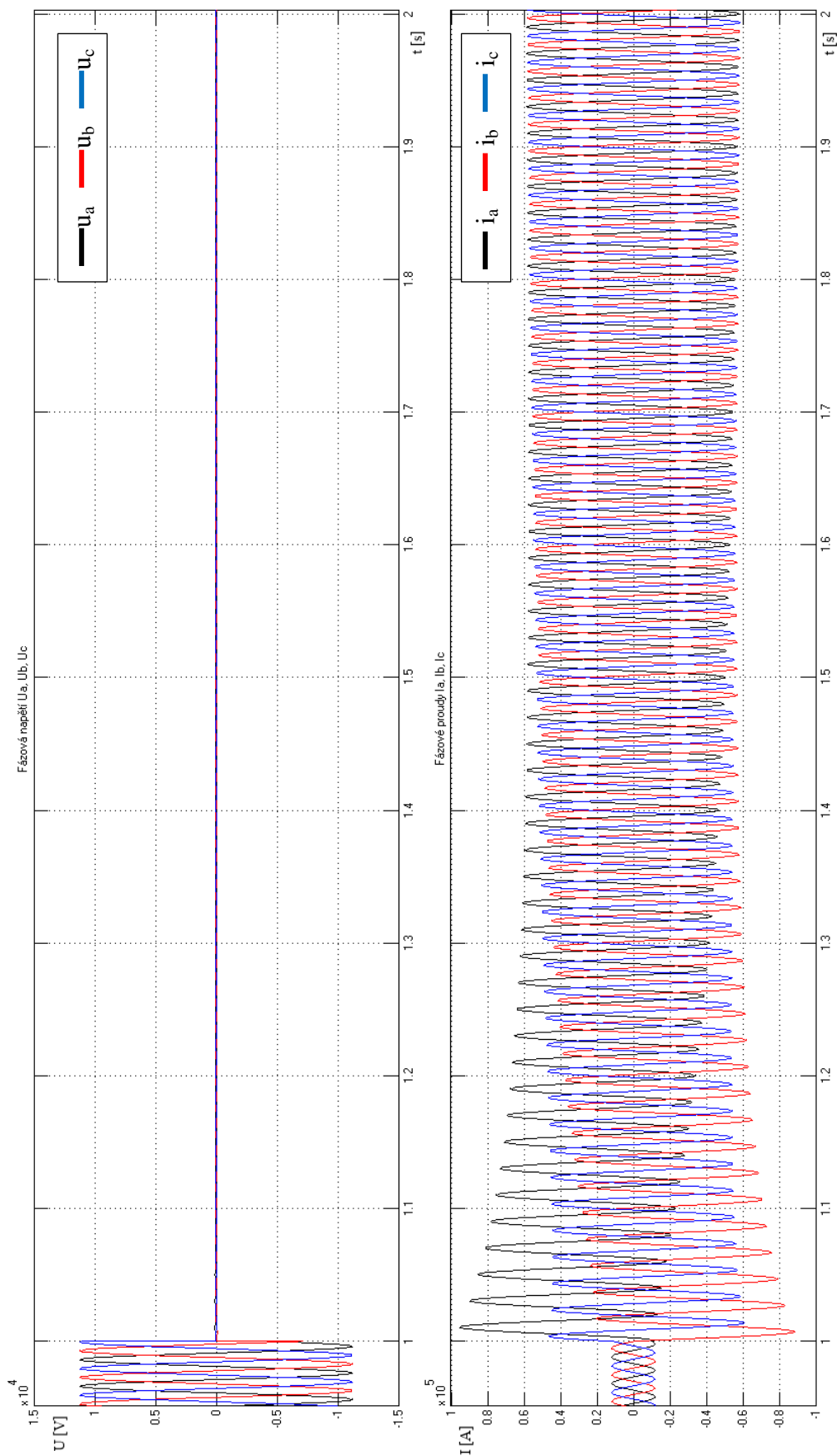
PŘÍLOHA B: SIMULACE ZKRATŮ NA SYNCHRONNÍM GENERÁTORU



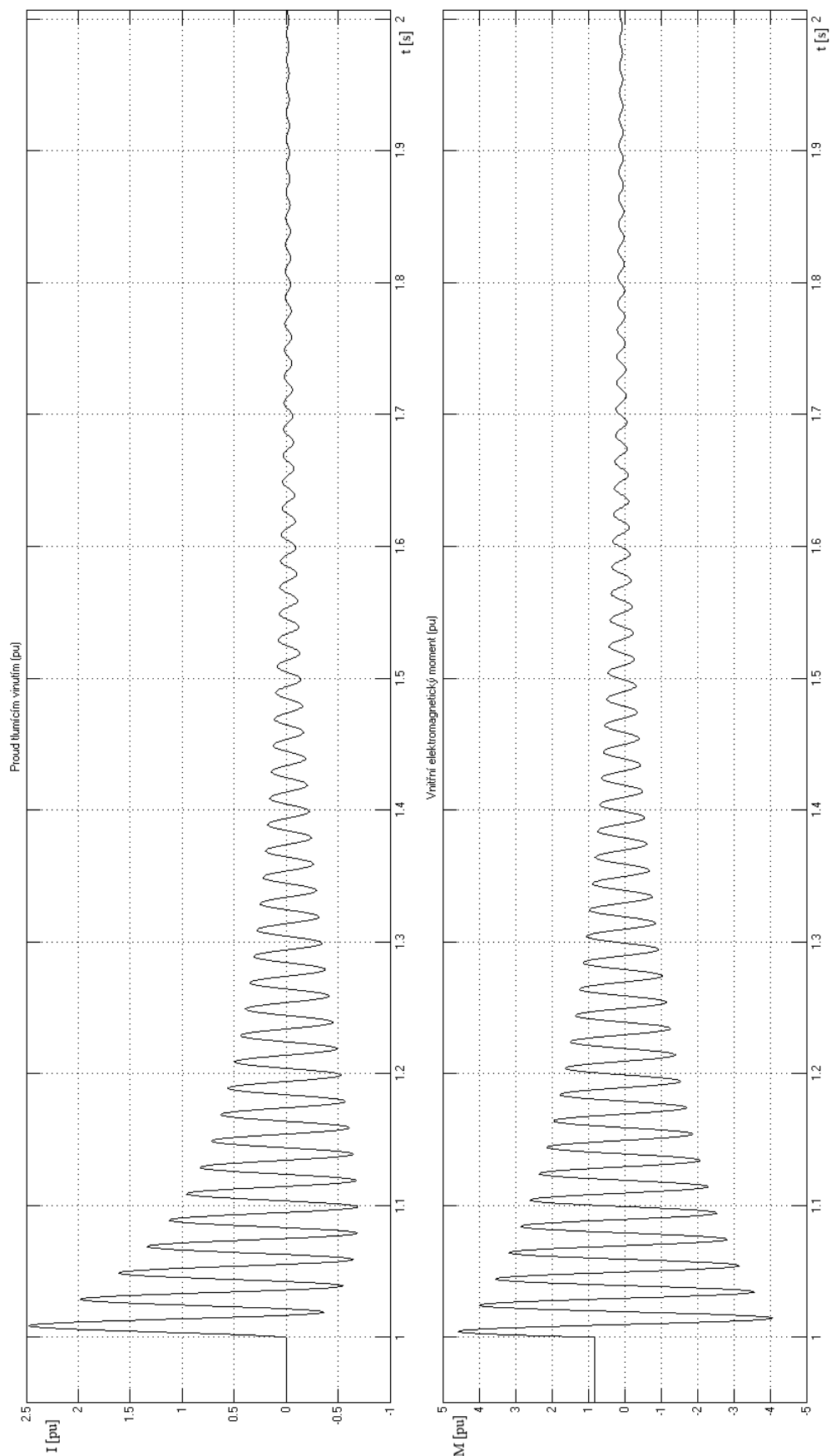
Obrázek 1 Průběh fázových napětí a proudů při jednofázovém zemním zkratu



Obrázek 2 Průběh proudu tlumicím vinutím a elektromagnetického momentu při jednofázovém zemním zkratu



Obrázek 3 Průběh fázových napětí a proudů při třífázovém zkratu



Obrázek 4 Průběh proudu tlumicím vinutím a elektromagnetického momentu při třífázovém zkratu